


**KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU**  
Konetekniikan koulutus

Jani Nevalainen

**MUOVIKOMPOSIITTIPROFIILIEN TAIVUTUSTESTAUS**

Opinnäytetyö  
Kesäkuu 2018

 <b>Karelia</b> AMMATTIKORKEAKOULU	<b>OPINNÄYTETYÖ</b> <b>Kesäkuu 2018</b> <b>Konetekniikan koulutus</b>  Tikkarinne 9 80200 JOENSUU +358 13 260 600
Tekijä Jani Nevalainen	
Nimeke Muovikomposiittiprofiilien taivutustestaus  Toimeksiantaja Exel Composites Oyj	
Tiivistelmä  <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli päivittää ja korvata muovikomposiittiputkien taivutustestausmenetelmiä ja testauksessa käytettävää laitteistoa, joita toimeksiantajan tehtaalla on käytetty. Tavoitteena oli, että testien tulokset saataisiin selvitettyä yksinkertaisemmalla ja nykyaikaisemmalla testausprosessilla kuin aiemmin. Materiaalien käyttäytymistä haluttiin myös päästä tutkimaan tarkemmin.</p> <p>Työ toteutettiin ottamalla käyttöön uusi, automatisoitu ja kehittyneempi testauslaite vanhan kaluston tilalle. Tärkein tehtävä oli suunnitella taivutustestauksen koejärjestely, määrittää testausohjelmat ja valita niihin oikeat asetukset siten, että testeissä saadaan selvitettyä vaadittavat tulokset luotettavasti. Näin pystytään osoittamaan putkien lujuusominaisuuksien riittävyys ja se, että tuote vastaa vaatimuksia. Työssä hyödynnettiin olemassa olevia testausstandardeja, aikaisemmin tehtyjä testejä ja toimeksiantajalla käytössä olleita menetelmiä. Tietoperustana käytiin läpi muovikomposiittien mekaanisten ominaisuuksien erityispiirteitä, laskentaa ja materiaalitekniistä käyttäytymistä.</p> <p>Laitteella päästiin ajamaan testejä ja tuloksia saatiin, kuten tavoite oli. Kun koeajossa saatuja tuloksia verrattiin vanhojen menetelmien vastaaviin tuloksiin, huomattiin niissä samankaltaisuutta, mutta myös poikkeavuuksia löytyi. Siksi jatkossa tulee selvittää, mistä poikkeavuudet johtuivat ja tarvitaanko tässä työssä tehtyihin ratkaisuihin liittyen korjaavia toimenpiteitä.</p>	
Kieli  suomi	Sivumäärä 44 Liitteet 6 Liitesivumäärä 13
Asiasanat  muovikomposiitit, mekaaniset ominaisuudet, materiaalintestaus	



**THESIS**  
**June 2018**  
**Degree Programme in Mechanical Engineering**

Tikkarinne 9  
FI 80200 JOENSUU  
+358 13 260 600  
FINLAND

Author  
Jani Nevalainen

Title  
Bend Testing of Plastic Composite Profiles

Commissioned by  
Exel Composites Oyj

**Abstract**

The aim of this thesis was to update and replace bending test methods and devices of plastic composite pipes used by the client. The goal was that the results of the tests would be solved through a simpler and more modern testing process than earlier. A more precise study of the behavior of these materials was also aimed at.

The thesis work was implemented by bringing a new automated and more advanced testing device into use, replacing the old equipment. The most important objective was to plan the testing setup and to define the test program by configuring its settings, so that the demanded results could be solved reliably. This way it can be proved that the strength properties are sufficient and that a product meets the requirements. Existing testing standards were made use of, along with tests made before and methods that have been used by the client. As a theoretical base, the mechanical properties of plastic composites were studied, as well as calculation and behavior from the perspective of materials engineering.

The tests were executed with the device and some results were obtained, as the goal was. When the results were compared with the earlier ones, similarities but also deviations were found. That is why in the future it should be solved where these deviations derived from and whether is it needed to correct the decisions made in this work.

Language

Finnish

Pages 44

Appendices 6

Pages of Appendices 13

Keywords

plastic composites, mechanical properties, materials testing

# Sisältö

Tiivistelmä

Abstract

1	Johdanto.....	5
1.1	Exel Composites Oyj .....	5
1.2	Opinnäytetyö ja sen tavoitteet.....	5
2	Muovikomposiittien mekaaninen käyttäytyminen ja testaus .....	7
2.1	Komposiitin koostumus .....	7
2.2	Kuitusuunta .....	9
2.3	Pinoamisjärjestys .....	11
2.4	Komposiittirakenteiden mekaniikka .....	12
2.4.1	Jännitykset.....	13
2.4.2	Muodonmuutokset .....	14
2.4.3	Kimmoarvot .....	16
2.4.4	Lujuudet .....	17
2.5	Komposiittien taivutus .....	17
2.5.1	Taivutuksessa syntyvät jännitykset .....	17
2.5.2	Nelipistetaivutus.....	19
2.5.3	Putkiprofiilin mekaanisten ominaisuuksien laskennallinen määrittäminen .....	22
3	Materiaalintestauslaitteen käyttöönotto.....	26
3.1	Laitteen ominaisuudet .....	26
3.2	Koejärjestely putken taivutustestaukseen .....	27
3.2.1	Taivutusväli.....	27
3.2.2	Taivutustukien päät .....	29
3.3	Ohjelma nelipistetaivutukselle .....	30
3.3.1	Testin aloituskohta .....	31
3.3.2	Testausnopeus .....	31
3.3.3	Taivutusjäykkyys .....	33
3.3.4	Taivutuslujuus .....	34
3.3.5	Taipuma ja venymä .....	36
3.3.6	Materiaalin pettäminen.....	37
3.4	Koeajon suorittaminen ja tulokset.....	39
4	Pohdinta.....	41
4.1	Tulokset ja menetelmät .....	41
4.2	Jatkokehitys.....	42
4.3	Oma oppiminen.....	43
	Lähteet.....	44
	Liitteet	

# **1 Johdanto**

## **1.1 Exel Composites Oyj**

Exel Composites Oyj on vuonna 1960 Suomessa perustettu yritys, joka nykyään suunnittelee, valmistaa ja markkinoi muovikomposiittiratkaisuja maailmanlaajuisesti. Ensimmäisiä tuotteita olivat sähkönallien sytyttimet ja kuulosuojaimet. 1970-luvulla alettiin keskittyä hiihtosauvojen valmistukseen, mikä osoittautui menestyksekkääksi valinnaksi. Seuraavien vuosikymmenten aikana tuotantoa kohdennettiin myös teollisuuden sovelluksiin. Sen jälkeen kasvua liiketoiminnassa on tapahtunut etenkin 2000-luvun alusta aina nykypäivään asti siten, että liikevaihto vuonna 2017 oli yli 86 miljoonaa euroa. Yhtiö on osa konsernia, jonka tehtailla ympäri maailmaa valmistetaan erilaisia profiileja ja laminaatteja. Niitä käytetään lukuisiin eri sovelluksiin: tuotteita toimitetaan mm. rakennusalan, energiantuotannon ja kuljetusvälineteollisuuden tarpeisiin. [1, 2, 3.]

Valmistuksessa käytetään enimmäkseen yhtiön valtaosin itse kehittämää pultruusioteknologiaa, jossa muovautuvaa raaka-ainetta vedetään suulakkeen läpi. Yhtiö onkin yksi maailman johtavista toimijoista pultruusioteknologian alalla. Muita käytössä olevia tuotantomenetelmiä ovat pultruusion tapainen pullwinding, co-winding, jatkuva laminointi ja ekstruusio. Tuotantolaitoksia konsernilla on nykyään useissa Euroopan maissa sekä Kiinassa. Tämän lisäksi vuonna 2018 tuotantotoiminta on laajenemassa myös Yhdysvaltoihin. Suomessa toimivaan emoyhtiö Exel Composites Oyj:hin kuuluu kaksi tehdasta, jotka sijaitsevat Mäntyharjulla ja Joensuussa. Mäntyharjun tehdas työllistää noin 90 henkilöä ja Joensuussa työntekijöitä on noin 120. [4, 5, 6.]

## **1.2 Opinnäytetyö ja sen tavoitteet**

Tässä opinnäytetyössä keskityttiin Exel Composites Oyj:n Joensuun Heinävaarassa sijaitsevalla tehtaalla valmistettavien komposiittiputkien mekaanisten ominaisuuksien testaukseen ja perehdyttiin muovikomposiittien materiaalitekniikkaan. Testausta varten tarvittiin kunnollinen laitteisto ohjelmineen sekä asiantuntemus niin laitteiston käyttöön kuin testattavien materiaalien lujuusopilliseen käyttäytymiseenkin.

Työn tarkoituksena oli ottaa käyttöön materiaalintestauslaite tehtaan laboratorioon ja perehtyä laitteen käyttöön. Laitetta tullaan käyttämään ensisijaisesti taivutuslujuuden ja taivutusjäykkyyden mittaamista varten. Laitteella testattavat kappaleet ovat komposiittiputkia ja -profiileja. Yhtenä tavoitteena oli tehostaa ja nykyaikaistaa testausprosessia korvaamalla vanhoja koetusmenetelmiä ja -laitteita. Asetukset tuli määrittää testausohjelmiin siten, että testien ajaminen onnistuisi turvallisesti ja nopeasti ja että tulokset olisivat luotettavia. Perehdytysmateriaalina toimivat laitteeseen kuuluvat ohjeet, joihin tutustuminen olikin olennainen osa tätä opinnäytetyötä. Näin varmistettiin laitteen turvallinen käyttö sekä riittävä asiantuntemus laitteen ja testausohjelmiston käyttöön. Työssä ehkä suurimpana haasteena oli, ettei kaikkia muovikomposiittien testausmenetelmiä ole standardoitu eli ei ole suoraan määritelty tapoja tai menetelmiä testien suorittamiseksi. Siksi tavoitteena olikin luoda toimeksiantajan vaatimuksia ja toiveita vastaava taivutustestausmenetelmä juuri kyseiselle laitteelle.

## 2 Muovikomposiittien mekaaninen käyttäytyminen ja testaus

Muovikomposiittien käyttö on yleistynyt viime vuosikymmenten aikana mm. maaliikenteen, ilmailun ja vesiliikenteen aloilla. Sama kasvusuunta jatkunee myös tulevaisuudessa, kun materiaalien jalostus kehittyy ja uusia sovelluksia keksitään. Kehityksen seurauksena esimerkiksi lentokoneiden ja autojen runkojen osista yhä suurempi osa valmistetaan nykyään hiili- ja lasikuitulujitteisista muoveista, jotka ovat eniten käytettyjä muovikomposiittien lajeja. Muissakin kohteissa, joissa näitä materiaaleja käytetään, arvostetaan yhä enemmän kevyitä rakenteita kestävyydestä tinkimättä. Kasvanutta suosiota selittävät osaltaan komposiittien mekaaniset ominaisuudet kuten korkea lujuus suhteessa painoon. Lujuuteen liittyen muovikomposiittien erityispiirteenä on myös se, että lujuusominaisuuksia pystytään suuntaamaan halutulla tavalla. Metalleihin verrattuna muovikomposiittien etuina ovat keveyden lisäksi korroosionkesto sekä se, että komposiitit ovat yleensä sähkön- ja lämmöneristeitä. Toisaalta niiden lämmönkesto ja kierrätettävyyden ovat metalleihin nähden huonoja. [6, 7.]

### 2.1 Komposiitin koostumus

Ajatuksena komposiittien valmistuksessa on yhdistää kaksi tai useampia ainesosia ja samalla tuoda yhteen aineiden parhaat puolet. Muovikomposiitti on laminaattirakenne, joka valmistetaan kerroksittain pitkillä kuiduilla lujitetusta kertamuovimateriaalista. Kovettamalla lähtöraaka-aine eli hartsi kemiallisesti saadaan aikaan kertamuovimatriisi. Kovetusreaktion jälkeen kertamuovi ei ole enää sulatettavissa. Taulukossa 1 on luokiteltu eri hartsityyppejä ominaisuuksien, käyttökohteiden ja hintojen perusteella. Hartseista yleisimmin käytössä on edullinen polyesterihartsi. Kun vaaditaan enemmän kemikaalinkestävyyttä, valitaan raaka-aineeksi vinyyliesteri. Paremmat mekaaniset ominaisuudet saavutetaan puolestaan epoksipohjaisella hartsilla, jonka hinta on jopa yli 20-kertainen polyesterihartsiin verrattuna. [7.]

Taulukko 1 Yhteenveto yleisimmin lujitemuoveissa käytetyistä hartsityypeistä. [8.]

Hartsi	Etuja	Käyttökohteita	hintaluokka
<b>Polyesteri (UP)</b>	hinta	linja-autot junat laivat	2–4
<b>Vinyyliesteri (VE)</b>	sitkeys kemikaalinkestävyys lämmönkestävyys	putket säiliöt altaat	4–5
<b>Epoksi (EP)</b>	mekaaniset ominaisuudet tarttuvuus eristävyys	lentokoneet urheiluvälineet piirilevyt liimat	7–50
<b>Fenoli (PF)</b>	vähäinen savunmuodostus mittapysyvyys säänkestävyys	lentokoneet kuljetusvälineet sähkökomponentit	5

On olemassa myös puolivalmisteita, joissa hartsi ja lujite on valmiiksi yhdistetty. Puolivalmisteita on saatavana myös kestopuovipohjaisina, ja näiden etuja kertamuoveihin verrattuna ovat mm. sitkeys, nopeampi valmistusprosessi ja kierrätettävyys. Lujitetta laminoidaan kerroksittain, kunnes saavutetaan haluttu materiaalivahvuus. Lujitekerrosten väliin tulee aina hartsin ja kovetteen muodostama kertamuovikerros. Lujitteen tarttuvuuden kertamuoviin on oltava hyvä, koska näiden aineiden välinen rajapinta on komposiitin murtolujuuden kannalta kriittisin kohta. Kun kuidut valitaan ja suunnataan oikein, saavutetaan tarvittava lujuus ja jäykkyys halutussa rasisuunnassa. Tällöin lujite kantaa komposiittirakenteeseen kohdistuvat ulkoisen kuormituksen aiheuttamat rasitukset ja vaikuttaa siten komposiittituotteen lujuusominaisuuksiin. [7.]

Lasikuitu on lujitteista selvästi suosituin johtuen edullisesta hinnastaan ja saatavuudestaan. Hiili- ja aramidikuiduilla lujitetut rakenteet ovat lujempia ja kevyempiä, mutta lujitteet ovat huomattavasti kalliimpia. Polyeteenikuidun käytön haasteina ovat huono lämmönkesto ja heikko tarttuvuus lujitteisiin. Sen käyttö on varsin marginaalista samoin kuin luonnonkuitujen, joiden saatavuus on huono ja laatu epätasaista. Taulukossa 2 on vertailtu eri lujitekuitujen ominaisuuksia. Näistä E-lasikuidulla on hyvät sähköiset ja mekaaniset ominaisuudet, kun taas S-lasi on lujempaa ja jäykempää. Lyhenne SM viittaa standardin mukaisen perustason kimmoduuliin. HM puolestaan tarkoittaa, että kuidulla on tätä perustasoa selvästi suurempi kimmoduuli. [7.]



Taulukko 2. Lujitemuoveissa käytettyjen kuitutyypin vertailua. [7, 8.]

Kuitutyyppi	Tiheys <i>kg/m<sup>3</sup></i>	Kimmo- moduuli <i>MPa</i>	Vetolujuus <i>MPa</i>	Murto- venymä <i>%</i>	Iskusitkeys
<b>Lasikuitu</b>					hyvä
E-lasi	2540	72000	3400	3,8	
S-lasi	2480	85000	4500	4,0	
<b>Hiilikuitu</b>					heikko
SM	1800	230000	4700	2,1	
HM	1850	455000	4100	0,9	
<b>Aramidikuitu</b>					erinomainen
HM	1450	180000	3450	1,9	
<b>Polyeteenikuitu</b>					erinomainen
HM	970	100000	3100	3,5	

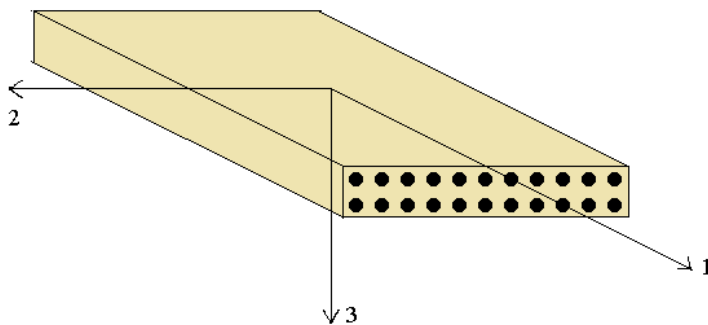
Yksinkertaisimmillaan lujitetta käytetään kuitukimppuna, jonka eri tyyppejä kutsutaan nimillä roving, lanka ja touvi. Näistä roving on lasikuitukimppu ja touvi on nimitys hiilikuitukimpulle. Kuitukimpuista on olemassa myös useita jatkojalosteita, joista muovikomposiittien valmistuksessa yleisimpiä ovat matot ja kankaat. Lujitematto koostuu sideaineella yhdistetyistä jatkuvista tai katkotuista kuiduista siten, että kuidut ovat maton tasossa satunnaisesti suuntautuneet. Lujitekankaiden yleisimpiä tyyppejä ovat yhdensuuntaiskangas, jossa kuitukimput on liitetty toisiinsa sidelangoilla, sekä keskenään kohtisuorista lujitekimpuista tai -langoista koostuva kudos. [9.]

## 2.2 Kuitusuunta

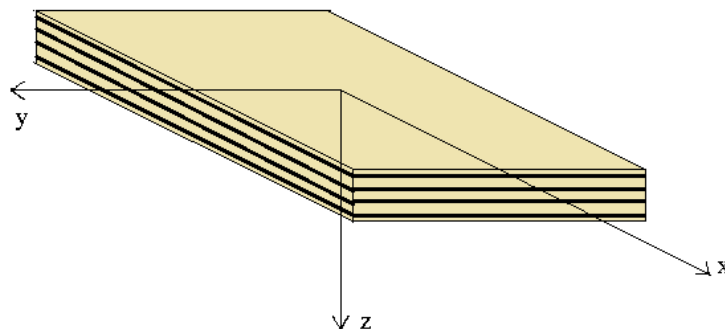
Laminaatin kuitusuunnan itseisarvoksi voidaan valita periaatteessa mitä tahansa väliltä 0°–90°. Suuntakulma voi siis olla myös negatiivinen. Kerrokset voidaan laminoida yhdensuuntaisesti, jolloin kuitujen suuntakulma on jokaisessa kerroksessa 0° eli koordinaatiston pääakselin suuntainen. Toinen tapa on laminoida kuidut ristikkäin. Ristikkäislaminaatin kuidut ovat pääakselin suunnassa ja sitä vastaan kohtisuorassa, eli suunnassa 0° ja 90°. Mikäli kumpikaan edellä mainituista suuntaustavoista ei täyty ominaisuusvaatimuksia, lujitekuidut voidaan myös pinota johonkin muuhun kulmaan. Tällaisessa kulmaladotussa laminaatissa jokaisen kerroksen suuntaus

on itseisarvoltaan sama, mutta kulma on vuoroin negatiivinen ja vuoroin positiivinen. Kulmaladottu ja ristikkäin ladottu laminaatti ovat balansoitujen laminaattien erikoistapauksia. Balansoidussa laminaatissa  $+\theta^\circ$ -suuntaisella kerroksella on parinaan kerros, jonka suunta on  $-\theta^\circ$ . Tämä ei kuitenkaan päde silloin, kun  $\theta=0^\circ$  tai kun  $\theta=90^\circ$ . Balansoituun rakenteeseen voi kuulua useitakin kerrospareja suuntakulman eri itseisarvoilla. [9.]

Yksittäisen kerroksen suuntaus ilmaistaan kerroskoordinaatistossa eli 123-koordinaatistossa, jossa akselit 1 ja 2 yhtyvät kerroksen pääsuuntiin muodostaen kerrostason kuvion 1 mukaisesti. Akseli 3 osoittaa kerrostasoa vastaan kohtisuoraan alaspäin. Kun tarkastellaan laminaatin mekaanisia ominaisuuksia, rasitukset ja jännitykset ilmaistaan laminaattikoordinaatistossa. Laminaattikoordinaatiston suunnat osoittaa kuviossa 2 näkyvä xyz-koordinaatisto, jonka x- ja y-akselit määrittävät laminaattitason ja samalla kerrostason. Koordinaatiston z-akseli osoittaa alaspäin kerroskoordinaatiston akselin 3 tavoin. Origo on laminaatin keskitasossa. Kuitusuunta määritellään näiden kahden koordinaatiston akseleiden, kuten esimerkiksi akseleiden x ja 1 välisellä kulmalla. [8, 9.]



Kuvio 1. Kerroskoordinaatisto, jossa kuvataan laminaatin kerroksen lujitekuitujen suunta. [8, 9.]

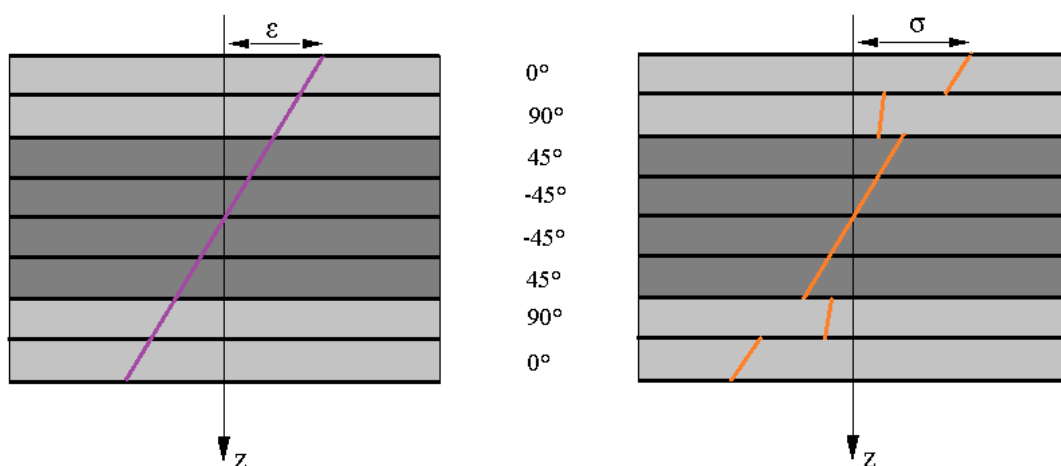


Kuvio 2. Laminaattikoordinaatisto, jonka avulla tarkastellaan pinotun laminaattirakenteen mekaanisia ominaisuuksia. [8, 9.]

### 2.3 Pinoamisjärjestys

Pinoamisjärjestyksen perusteella laminaatit luokitellaan symmetrisiin, antisymmetrisiin ja epäsymmetrisiin rakenteisiin. Symmetrinen pinoamisjärjestys, josta on esitetty esimerkki kuviossa 3 tarkoittaa, että kerrossuuntaukset ovat keskitason suhteen symmetrisiä. Antisymmetrisesti pinoatussa laminaatissa keskitason molemmin puolin samalla etäisyydellä keskitasosta olevilla kerroksilla on aina itseisarvoltaan sama kuitusuuntaus, mutta suuntakulman etumerkki on vastakkainen. Näin ollen  $+\theta^\circ$ -suuntaisen kerroksen pari keskitason toisella puolella on suunnaltaan  $-\theta^\circ$ . Jos pinoamisjärjestys ei täytä symmetrisen tai antisymmetrisen rakenteen tunnuspiirteitä, kyseessä on epäsymmetrinen pinoamisjärjestys. [9.]

Kuten kuviosta 3 huomataan, lujitekerrosten suuntauksilla on merkittävä vaikutus laminaatin lujuuteen ja jäykkyyteen. On myös huomattava, että kerrokset vaikuttavat toinen toisiinsa, koska niiden välillä oleva kiinteä matriisi siirtää rasituksia. Taivutuksessa murtuminen saattaa tapahtua sisäkerroksissa ennen ulkokerrosta, jos sisäkerrokseen kohdistuu suurempi jännitys. Jäykkyys puolestaan riippuu siitä yhteisvaikutuksesta, joka eri kerrosten suuntauksista syntyy. Epäsymmetrisen laminaatin tapauksessa voi syntyä vääristymiä ja venymistä veto- ja taivutus-testauksessa, koska jännitys jakautuu epäsymmetrisesti eri kerroksiin. Myös ulkoisilla olosuhteilla on oma vaikutuksensa, sillä lämpötilan muutos ja veden imeytyminen laminaattiin aiheuttavat jännitystiloja. [9.]



Kuvio 3. Symmetrisen laminaatin venymä  $\epsilon$  ja jännitys  $\sigma$  taivutuksessa. Kuvioon on merkitty yhdensuuntaiskerrosten suuntakulmat. [9.]

## 2.4 Komposiittirakenteiden mekaniikka

Matriisimuovit voidaan usein olettaa isotrooppisiksi eli niiden mekaaniset ominaisuudet ovat joka suunnassa tarkasteltuna likimain samanlaiset. Lujitekuidun pituussuuntaiset ominaisuudet poikkeavat usein poikittaissuunnaisista, mutta poikittaissuunnan ominaisuudet ovat kuitenkin tarkastelusuunnasta riippumattomat, eli puhutaan tasoisotrooppisesta materiaalista. Tällöin lujitekuidun poikittaistasoa kutsutaan isotropiatasoksi. Pitkillä ja suunnatuilla kuiduilla lujitetun laminaattien ominaisuudet riippuvat aina tarkastelusuunnasta eli ovat anisotrooppisia. Sen sijaan lyhyillä, satunnaisesti suunnatuilla kuiduilla lujitetut muovit ovat makroskooppisesti isotrooppisia. [9.]

Yksittäisen kuidun tavoin yhdensuuntaisesti laminoitu kerros on makroskooppisesti tasoisotrooppinen, koska sen ominaisuudet kuituja vastaan kohtisuorassa tasossa ovat tarkastelusuunnasta riippumatta samanlaiset. Sama pätee mattolujitteiseen kerrokseen, jossa kuidut ovat satunnaisesti suuntautuneet. Erotuksena yhdensuuntaiskerrokseen on kuitenkin se, että mattokerroksen isotropiataso on kerrostaso. Jos kuitulujitetun kerroksen ominaisuudet ovat pääsuuntien (123-koordinaatisto) määrittelemien tasojen suhteen symmetriset, kutsutaan sitä ortotrooppiseksi. Esimerkiksi kudoksella lujitettu kerros on ortotrooppinen, eikä sillä siten ole isotropiatasoa. [9.]

Muovikomposiitin yksittäinen kerros tai muuten yksinkertainen komposiittirakenne voidaan olettaa makroskooppisesti homogeeniseksi, jolloin sen ominaisuuksien oletetaan olevan kaikkialla materiaalissa samanlaiset. Tämän oletuksen nojalla komposiittien mekaaninen käyttäytyminen on yksinkertaisemmin kuvattavissa ja hahmotettavissa. Todellisuudessa aineosat eli lujitekuidut ja muovimatriisit ovatkin varsin homogeenisiä, mutta komposiittirakenne kokonaisuudessaan on aina epähomogeeninen. [9.]

Lujitekuidut käyttäytyvät lähes murtumiseensa asti lineaariselastisesti, mikä tarkoittaa, että kuorman kasvaessa materiaalin muodonmuutos kasvaa suoraan verrannollisena kuormaan nähden. Tapahtunut muodonmuutos palautuu ennalleen kuorman poistuessa, kunhan kuormitus on ollut lyhytaikainen ja tarpeeksi alhainen. Elastisuuden kannalta lujitekuidut määräävät pääasiassa muovikomposiitin mekaaniset ominaisuudet, joten komposiittirakenne kokonaisuudessaan voidaan olettaa lineaariselastisesti käyttäytyväksi. [9.]

### 2.4.1 Jännitykset

Kun materiaalia kuormitetaan, siihen syntyy kuormitustila, jota tarkastellaan jännitysten avulla. Kuormituslajeja ovat tasovoimat, momentit tai leikkausvoimat. Näistä aiheutuvat jännitykset voivat olla normaali-, taivutus- tai leikkausjännityksiä riippuen siitä, minkä tyyppinen kuormitus on ja mihin suuntiin se vaikuttaa. Normaalijännitys määritellään laskennallisesta näkökulmasta seuraavasti:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

missä  $\sigma$  = veto- tai puristusjännitys [ $N/mm^2$ ]  
 $F$  = jännityksen aiheuttava voima [N]  
 $A$  = kappaleen poikkipinta-ala [ $mm^2$ ].

[9, 10.]

Laminaattirakenteessa jännitykset muuttuvat hyppäyksittäin erilaisten tai erisuuntaisten kerrosten rajapinnoissa kuviossa 3 nähdyllä tavalla. Kun kerrokset oletetaan makroskooppisesti homogeenisiksi ja lineaariselastisesti käyttäytyviksi, jännitysten tarkastelu on yksinkertaisempaa. Oletuksen nojalla kunkin kerroksen sisäinen jännitys on z-koordinaatin lineaarinen funktio. [9.]

Koska laminaattirakenne on anisotrooppinen, on todellisten jännitysten sijaan mielekkäämpää tutkia laminaattien normalisoituja eli keskimääräisiä jännityksiä. Kun tunnetaan laminaattiin kohdistuva tasovoima, voidaan normalisoitu tasojännitys selvittää jakamalla voima laminaatin paksuudella:

$$\sigma^0 = \frac{N}{h}$$

missä  $\sigma^0$  = normalisoitu tasojännitys [ $N/mm^2$ ]  
 $N$  = laminaattia kuormittava tasovoima [N]  
 $h$  = laminaatin paksuus [mm].

[9.]

Toisin kuin todellinen taivutusjännitys, normalisoitu taivutusjännitys jakautuu koko laminaatin halki z-koordinaatin lineaarisen funktion tavoin. Se vaikuttaa näennäisesti vain laminaatin pinnalla ja aiheuttaa saman venymän kuin todellinen jännitys. Normalisoitu taivutusjännitys riippuu laminaatin paksuudesta ja taivutusmomentista seuraavan kaavan mukaisesti:

$$\sigma^f = \frac{6}{h^2} M_t$$

missä  $\sigma^f$  = normalisoitu taivutusjännitys [ $N/mm^2$ ]

$h$  = laminaatin paksuus [mm]

$M_t$  = taivutusmomentti [Nmm].

[9.]

#### 2.4.2 Muodonmuutokset

Kuormitus aiheuttaa jännitysten ohella normaalivenymiä ja liukumia. Normaalivenymä ilmaistaan materiaalin suhteellisenä pituuden muutoksena ja suunta laminaattikoordinaatiston akselien avulla:

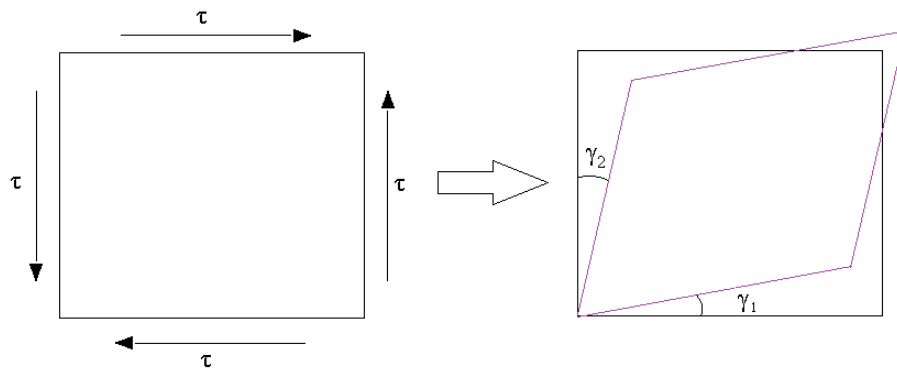
$$\varepsilon_x = \frac{\Delta L_x}{L_x} ; \varepsilon_y = \frac{\Delta L_y}{L_y} ; \varepsilon_z = \frac{\Delta L_z}{L_z}$$

missä  $\Delta L$  = pituuden muutos [mm]

$L$  = alkuperäinen pituus [mm].

[9, 10.]

Liukumalla eli liukukulmalla tarkoitetaan leikkausjännityksestä johtuvaa muodonmuutosta, jossa materiaalin muoto vääristyy. Esimerkiksi kuvion 4 mukaisen kappaleen suorakulmion muotoinen pinta muuttuu leikkaustasossa suunnikkaan muotoiseksi, kun kaikilla sivuilla vaikuttaa sama leikkausjännitys  $\tau$ . [9.]



Kuvio 4. Leikkausjännitys  $\tau$  ja sen aiheuttamat liukumat  $\gamma_1$  ja  $\gamma_2$  [9.]

Kun oletetaan laminaatin poikkileikkaustasojen säilyttävän muotonsa kuormituksen alaisina, laminaatin tasovenymät ovat z-koordinaatin lineaarisia funktioita kuviossa 3 nähdyllä tavalla. Tasovoimat ja taivutusmomentit aiheuttavat laminaattiin venymiä tasossa seuraavan säännön mukaisesti. Kun kaavaan sijoitetaan z-koordinaatin arvoksi  $h/2$  tai  $-h/2$ , saadaan ratkaistua laminaatin ala- tai yläpinnan venymä.

$$\varepsilon = \varepsilon^0 + \frac{z}{h/2} \varepsilon^f$$

missä  $\varepsilon$  = kokonaisvenymä xy-tasossa  
 $\varepsilon^0$  = laminaatin keskitason venymä  
 $h$  = laminaatin paksuus [mm]  
 $z$  = z-koordinaatin arvo [mm]  
 $\varepsilon^f$  = taivutusvenymä.

[9.]

### 2.4.3 Kimmoarvot

Luvussa 2.4 todettiin laminaatin olevan aina anisotrooppinen, joten laminaatin kimmoarvot riippuvat tarkastelusuunnasta. Kerroksen voidaan usein olettaa olevan tasoisotrooppinen. Isotrooppiselle ja lineaariselastisesti käyttäytyvälle materiaalille pätee Hooken laki, joka määrittelee materiaalin tasojäykkyyden normaali-jännityksen ja venymän välisenä suhteena. Lausekkeeseen kuuluu näiden tekijöiden lisäksi kertoimena toimiva materiaalivakio eli kimmomoduuli:

$$\sigma = E\varepsilon$$

missä  $\sigma$  = normaali-jännitys eli veto tai puristus [ $N/mm^2$ ]

$\varepsilon$  = kuormituksen aiheuttama venymä

$E$  = kimmomoduuli [ $N/mm^2$ ].

[9, 10.]

Hooken laki ilmaisee muodonmuutoksen kuormitussuunnassa. Materiaali venyy myös kuormitusta vastaan kohtisuorassa suunnassa. Puristusrasituksessa materiaali laajenee puristusta vastaan kohtisuorassa suunnassa ja vastaavasti kutistuu vetorasituksessa. Poissonin vakio kertoo näiden muodonmuutosten välisen suhteen isotrooppiselle materiaalille. Kun kuormitusta tapahtuu vain x-akselin suunnassa ja tarkastellaan venymiä x- ja y-akselien suunnissa, voidaan Poissonin luvulle kirjoittaa lauseke:

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}, \sigma_x \neq 0 \text{ ja } \sigma_y = \sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = \tau_{xy} = 0$$

missä  $\nu_{xy}$  = Poissonin luku

$\varepsilon_y$  = venymä y-akselin suunnassa

$\varepsilon_x$  = venymä x-akselin suunnassa

$\sigma$  = normaali-jännitys [ $N/mm^2$ ]

$\tau$  = leikkausjännitys [ $N/mm^2$ ].

[9.]



Materiaaliin kohdistuu usein myös leikkauskuormitusta. Tällöin leikkausjännityksen ja liukuman välillä on yhteys. Myös tämä sääntö pätee ainoastaan isotrooppiselle materiaalille.

$$\tau = G\gamma$$

missä  $\tau$  = leikkausjännitys [ $N/mm^2$ ]

$G$  = liukumoduuli [ $N/mm^2$ ]

$\gamma$  = liukuma [rad].

[9, 10.]

#### 2.4.4 Lujuudet

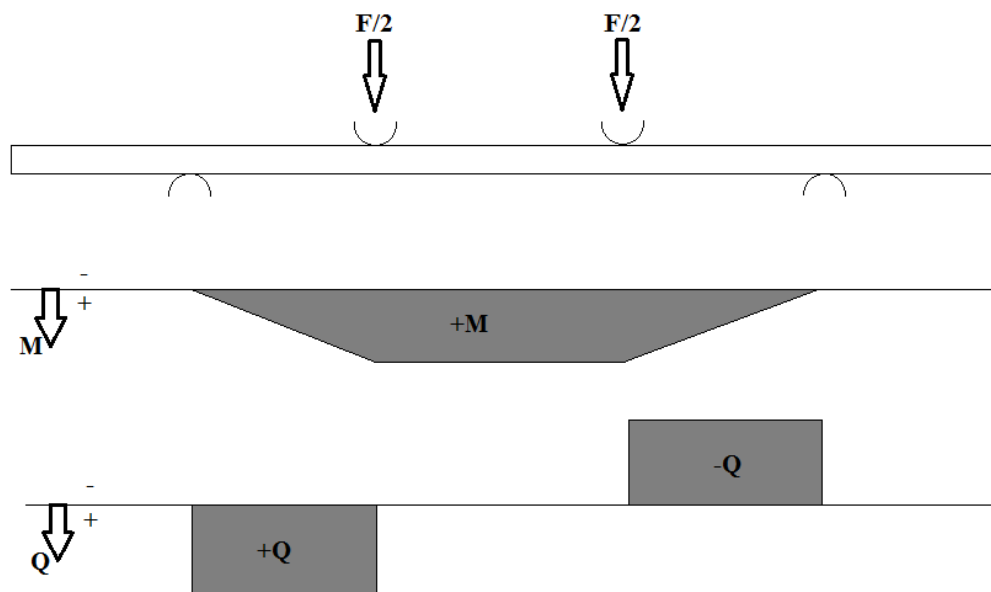
Laminaattien tapauksessa lujuus kuvaa laminaatissa olevaa jännitystä, joka materiaalissa on pettämishetkellä. Jännityksen lajeja ovat normaali-jännitykset eli veto ja puristus, sekä leikkaus. Kuormitustavasta riippuen voidaan tarkastella kappaleen poikkileikkaukseen syntyvää keskimääräistä jännitystä tai vaihtoehtoisesti tiettyyn kohtaan syntyvää maksimijännitystä. Toisinaan laminaatin petttämisessä on erotettavissa myötämisen ja lopullisen pettämisen vaiheet, joita vastaavat jännityksen arvot myötöjännitys ja murtojännitys. Hauraammilla materiaaleilla, kuten hiilikuitukomposiiteilla vaurioitumisvaihetta on usein hankala erottaa, koska rakenne käyttäytyy varsin lineaariselastisesti aina murtumiseensa saakka. Monikerroksisen muovikomposiitin ominaisuuksien riippuvuus tarkastelusuunnasta ilmenee esimerkiksi verrattaessa yhdensuuntaislaminaatin lujuuksia eri suunnissa: kuitujen suunnassa vetolujuus on selvästi puristuslujuutta suurempi, kun taas kuituja vastaan kohtisuorassa suunnassa tilanne on päinvastainen. [9.]

### 2.5 Komposiittien taivutus

#### 2.5.1 Taivutuksessa syntyvät jännitykset

Taivutuskuormituksen erikoisuutena muihin kuormituslajeihin verrattuna voidaan pitää sen monipuolista rasittavuutta, koska taivutuksessa syntyy niin vetoa, puristusta kuin leikkaustakin.

Yhdensuuntaislaminaatissa taivutusmomentin aiheuttaman normaali-jännityksen ajatellaan yleisesti jakautuvan venymän tavoin lineaarisesti. Suurimmillaan jännitys on laminaatin pinnoissa, kun taas keskitasossa eli neutraaliakselilla jännityksen arvo on nolla. Taivutusmomentti on kuormituskomponentti, joka jakautuu kuviossa 5 näkyvällä tavalla ja voi aiheuttaa laminaatin murtumisen ja pettämisen. Toinen tällainen kuormituskomponentti on kuviossa 5 esitetty laminaattitasoon nähden kohtisuorassa suunnassa vaikuttava leikkausvoima, jonka muodostama jännitys on suurimmillaan keskitasossa. Jännitys pienenee symmetrisesti sekä laminaatin yläpintaa että alapintaa kohti mentäessä. Leikkausjännityksen aiheuttama muodonmuutos eli liukuma on laminaatissa tyypillisesti suurempi taivutusmomentin aiheuttamiin venymiin verrattuna. [9.]



Kuvio 5. Taivutusmomentin ( $M$ ) ja leikkausvoiman ( $Q$ ) jakautuminen koesauvaan nelipiste-taivutuksessa [8, 9.].

Kun taivutus kohdistuu yhdensuuntaiskerroksista koostuvaan laminaattiin, jonka kerrossuuntaukset vaihtelevat, venymä jakautuu lineaarisesti kuten yhdensuuntaislaminaatissakin. Normaali-jännitys jakauma on kuitenkin vaihtelevista kerrossuuntauksista johtuen epäjatkuva, eli jännityksen arvo muuttuu hyppäyksittäin kerroksesta toiseen. Se miten suuret jännityksen arvot ovat ja miten laminaatti vastaa taivutukseen, riippuu suuntauksista ja pinoamisjärjestyksestä. Leikkausjännitys jakautuu yhdensuuntaiskerroksista koostuvaan laminaattiin samalla tavalla kuin yhdensuuntaislaminaattiin. [9.]

## 2.5.2 Nelipistetaivutus

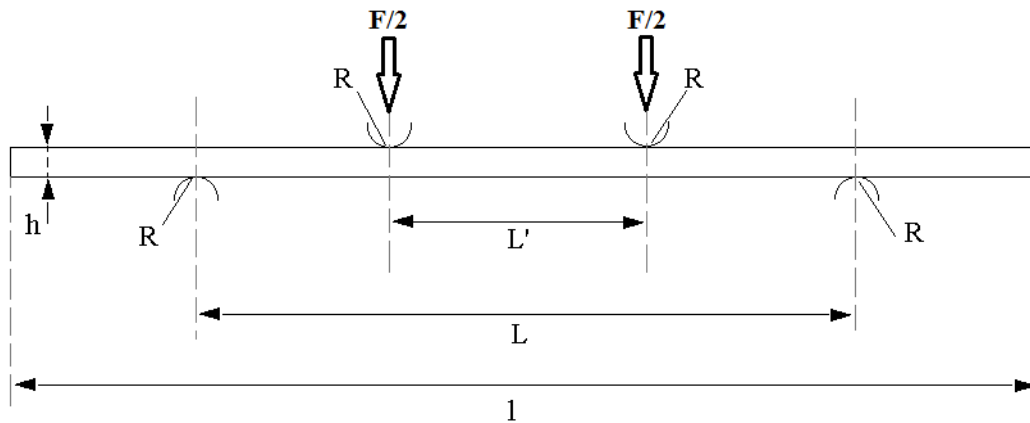
Standardin mukaan nelipistetaivutuksen koestusperiaate on, että poikkileikkaukseltaan suorakulmion muotoista näytettä taivutetaan tasaisella nopeudella, kunnes näyte murtuu tai taipuma saavuttaa ennalta määrätyn arvon. Näytteen tulee olla materiaaaliltaan kuitulujitettua muovikomposiittia. Kuormitus toteutetaan käyttäen kahta kuormituspäätä. Taivutuksen aikana mitataan kappaleeseen kohdistuva voima (N) ja muodonmuutoksen suuruus eli taipuman arvo (mm). Menetelmän avulla voidaan tarkastella näytteen käyttäytymistä kuormituksen eri vaiheissa. Mitatuista arvoista voidaan määrittää materiaalin taivutuslujuus, kimmomoduuli ja muut jännitys/venymä-suhteesta riippuvat asiat. [11.]

Kuten aiemmin todettiin, taivutuksessa kuormitettavaan kappaleeseen kohdistuu aina leikkausvoimia, joiden seurauksena materiaaliin syntyy leikkausjännityksiä. Tavoite on, ettei leikkausjännitys olisi hallitseva kuormituskomponentti eikä leikkaantumista siten tapahtuisi, koska tällöin taivutusmomenttia tai siitä riippuvia jännityksiä ei pystyttäisi kunnolla selvittämään. Kun näytettä taivutetaan standardin mukaisesti laminaattikoordinaatiston x-akselin suhteen, leikkaantuminen tai leikkausjännityksestä johtuva muodonmuutos voi tapahtua kerrosten suuntaisesti, jolloin kerrokset irtoavat toisistaan. Tämä johtuu yleensä matriisimuovin ja lujitekuidun liitoskohdan pettämisestä. Leikkaantuminen voi tapahtua myös muussa suunnassa siten, että lujitekerros itsessään pettää. [9, 11.]

Taivutusmomentti ilmenee näytteen yläpinnassa puristusjännityksenä ja alapinnassa vetojännityksenä. Kolmipistetaivutukseen nähden nelipistetaivutuksessa saavutetaan pieni etu taivutusmomentin muodostumisen kannalta. Kun kuorma  $F$  jakautuu kahdelle kuormituspäälle, taivutusmomentti on kuviossa 5 nähdyllä tavalla vakio kuormituspäiden välisellä alueella. Pelkästään yhdellä kuormituspäällä painettaessa kuormituspää aiheuttaisi näytteen keskikohtaan suuremman paikallisen kontaktirasituksen vielä taivutusrasituksen lisäksi. Tämän seurauksena materiaali pettäisi mahdollisesti ennen kuin yläpinnan todellinen puristuslujuus saavutettaisiin. Taivutusmomentin lisäksi leikkausjännitys jakautuu nelipistetaivutuksessa koessaihin hieman suotuisammin kokeen onnistumisen kannalta, koska kuormituspäiden välisellä alueella leikkausvoima on nolla. [9, 11.]

Standardin mukaisessa nelipistetaivutuksessa näytteen tuenta tehdään kuvion 6 mukaisesti. Alempi taivutusväli  $L$  ja ylempi taivutusväli eli kuormitusväli  $L'$  tulee valita siten, että  $L=3L'$ .

Tuenta on pyrittävä toteuttamaan siten, että näyte pääsee liukumaan mahdollisimman vapaasti tukien suhteen. Käytännössä siis kitkakerroin näytteen ulkopinnan ja tukipintojen välillä olisi saatava mahdollisimman pieneksi. [11.]



Kuvio 6. Standardin mukainen nelipistetaivutuksen koejärjestely. Kuviossa

$L$  = alempi taivutusväli

$L'$  = kuormitusväli

$l$  = näytteen pituus

$h$  = näytteen korkeus

$R$  = alemman taivutustuen pään ja kuormituspään kaarevuussäde

$F$  = kuormitusvoima

[11.]

Standardissa ASTM D8069-17 esitetään kolmipistetaivutusmenetelmä komposiittiprofiilien kimmomoduulin määrittämiseksi. Standardin mukaan näytteen tulee olla putruusiomenetelmällä valmistettu tuote, jonka poikkileikkaus on kahdessa suunnassa symmetrinen geometrisen painopisteensä suhteen. Taivutustukien päiden ja kuormituspäiden säteiden tulee olla noin kaksinkertaisia näytteen paksuuteen nähden. [12.]

Standardin D8096-17 antama ohjearvo alemman taivutusvälin pituudelle on  $20 \leq L/h \leq 32$  [12]. Standardissa ISO 14125 vastaava arvo riippuu materiaaluokasta. Yhdensuuntaislaminaateille pätee taivutusvälin ja näytteen korkeuden välinen suhde  $L/h=40,5$ .

Suhdeluku pätee lisäksi osalle sellaisista laminaateista, joiden kuitusuunta vaihtelee, kunhan niiden taivutusmoduuli ja leikkausmoduuli täyttävät ehdon:

$$15 < E_{f1}/G_{13} \leq 50$$

missä  $E_{f1}$ = taivutusmoduuli 1-akselin suunnassa eli pituussuunnassa [ $N/mm^2$ ]  
 $G_{13}$ = liukumoduuli 1- ja 3-akselien eli pituussuunnan ja paksuussuunnan määrittä-  
 mässä tasossa [ $N/mm^2$ ].

[11.]

Taivutusmoduulin määrittämisessä käytetään taivutusvenymän muutosta arvosta 0,05 % arvoon 0,25 %. Tietokoneella ohjattavaa testauslaitetta käytettäessä nämä rajat voidaan syöttää suoraan ohjelman parametreihin, koska ohjelma pystyy määrittämään venymän laskennallisesti. Mikäli tällaista automatiikkaa ei käytössä ole, voidaan laskea venymiä vastaavat taipumat seuraavilla kaavoilla:

$$s' = \frac{\varepsilon_f' L^2}{4,7h} \text{ ja } s'' = \frac{\varepsilon_f'' L^2}{4,7h}$$

missä  $s'$ = taipuma venymän arvon ollessa 0,0005 [mm]  
 $\varepsilon_f'$ = taivutusvenymä 0,0005  
 $L$ = alempi taivutusväli [mm]  
 $h$ = näytteen paksuus [mm]  
 $s''$ = taipuma venymän arvon ollessa 0,0025 [mm]  
 $\varepsilon_f''$ = taivutusvenymä 0,0025.

[11.]

Kun taipuman muutosta  $\Delta s = s'' - s'$  vastaava voiman muutos  $\Delta F$  tunnetaan, voidaan taivutusmoduuli laskea kaavalla:

$$E_f = \frac{0,21L^3}{bh^3} * \left( \frac{\Delta F}{\Delta s} \right)$$

missä  $E_f$ =taivutusmoduuli [ $N/mm^2$ ]

$L$ = alempi taivutusväli [mm]

$b$ = näytteen leveys [mm]

$h$ = näytteen paksuus [mm]

$\Delta F$ = voiman muutos [N]

$\Delta s$ = taipuman muutos [mm].

[11.]

Nelipistetäivutuksen testausnopeuden laskemiselle on määritelty kaava standardissa. Kyseessä on nopeus, jolla kuormituspäättä ajetaan näytettä taivutettaessa. Annetun kaavan mukaan nopeuden arvo riippuu alempien taivutustukien etäisyydestä ja näytteen korkeudesta. Tarkoituksena on ratkaista nopeus, jolla taivutusvenymää saadaan nostettua 1 prosentti minuutissa.

$$v = \frac{\varepsilon' L^2}{4,7h}$$

missä  $\varepsilon'$  = venytysnopeus 0,01 [1/min]

$L$  = alempi taivutusväli [mm]

$h$  = näytteen korkeus [mm].

[11.]

### 2.5.3 Putkiprofiilin mekaanisten ominaisuuksien laskennallinen määrittäminen

Materiaalin mekaanisia ominaisuuksia voidaan kuvata teoreettisesti laskemalla. Luvussa 2.5.2 käsitellyt standardit eivät päde putkien nelipistetäivutukseen, eikä niiden laskukaavoja täten voida suoraan soveltaa putkiprofiilien mekaanisten ominaisuuksien määrittämisessä. Kuitenkin putken testaukseenkin on olemassa laskukaavoja. Taivutustestauksen kannalta oleellisia lasket-

tavia suureita ovat momentti, jännitys, venymä ja kimmomoduuli. Näiden suureiden laskemiseen tarvitaan tiedot kuormien suuruuksista, näytekappaleen mitoista ja taipumasta, sekä taivutusväleistä.

Taivutussuureiden laskennassa taivutettava kappale on tyypillisesti sijoitettu koordinaatistoon siten, että taivutus tapahtuu x-akselin suhteen eli pituussuunnassa. Koordinaatiston y-akseli on kappaleen korkeussuunnassa ja z-akseli syvyysuunnassa. Tästä seuraa, että xz-taso on neutraalitaso, eli se ei veny eikä siinä esiinny normaali-jännityksiä. Ehkä tärkein taivutuskormituksen liittyvistä suureista on momentti. Suurin nelipistetaivutuksessa syntyvä taivutusmomentti voidaan määrittää kaavalla:

$$M_{tx} = \frac{L - L'}{4} F$$

missä  $M_{tx}$  = taivutusmomentti x-akselin suhteen [Nmm]

$L$  = alempi taivutusväli [mm]

$L'$  = kuormitusväli [mm]

$F$  = voima [N].

[13.]

Taivutusvastus on kappaleen muodosta riippuva suure. Poikkileikkaukseltaan ympyrän muotoisen putken taivutusvastus riippuu ulko- ja sisähalkaisijasta:

$$W_z = \frac{\pi(D_1^4 - D_2^4)}{32D_1}$$

missä  $W_z$  = taivutusvastus z-akselin suhteen [ $mm^3$ ]

$D_1$  = putken ulkohalkaisija [mm]

$D_2$  = putken sisähalkaisija [mm].

[10.]

Taivutuksessa putken yläpintaan syntyy putken pituussuuntainen puristusjännitys ja vastaavasti alapintaan vetojännitys. Poikkileikkaukseen syntyvä suurin normaalijännitys voidaan ilmaista taivutusmomentin ja taivutusvastuksen avulla:

$$\sigma_{tx} = \frac{M_{tx}}{W_z} = \frac{L - L'}{4} F * \frac{32D_1}{\pi(D_1^4 - D_2^4)} = \frac{8D_1(L - L')}{\pi * (D_1^4 - D_2^4)} F$$

missä  $\sigma_{tx}$  = taivutusjännitys x-akselin suhteen [ $N/mm^2$ ]

$M_{tx}$  = taivutusmomentti x-akselin suhteen [Nmm]

$W_z$  = taivutusvastus z-akselin suhteen [ $mm^3$ ]

$L$  = alempien taivutusväli [mm]

$L'$  = kuormitusväli [mm]

$D_1$  = putken ulkohalkaisija [mm]

$D_2$  = putken sisähalkaisija [mm]

$F$  = voima [N].

[10, 13.]

Jännityksen laskentaa voidaan jatkojalostaa laskemalla myös niin sanottu todellinen jännitys, jossa huomioidaan kuormituksesta johtuvan venymän vaikutus. Jännityksen kasvaessa myös venymä kasvaa, jolloin jännitys kertautuu seuraavan lausekkeen mukaisesti:

$$\sigma_{tr} = \sigma * (1 + \varepsilon)$$

missä  $\sigma_{tr}$  = todellinen jännitys, jossa huomioidaan poikkipinta-alan muutos [ $N/mm^2$ ]

$\sigma$  = jännitys, kun oletetaan poikkipinta-alan pysyvän vakiona [ $N/mm^2$ ]

$\varepsilon$  = laskennallisesti määritetty venymä.

[14.]



Nelipistetaivutuksessa putken poikkileikkaukseen syntyvän maksimivenymän  $\varepsilon$  ja sitä vastaavan taipuman  $\Delta s$  välillä on seuraava yhteys:

$$\varepsilon = \frac{6D_1(L - L')\Delta s}{L^3 - 3L(L')^2 + 2(L')^3}$$

missä  $\varepsilon$  = putken poikkileikkauksen maksimivenymä nelipistetaivutuksessa

$D_1$  = putken ulkohalkaisija [mm]

$L$  = alempi taivutusväli [mm]

$L'$  = kuormitusväli [mm]

$\Delta s$  = taipuma [mm].

[10.]

Hooken lain mukaan materiaalin jäykkyyttä kuvaava kimmomoduuli on jännityksen ja venymän suhde. Putken nelipistetaivutuksessa määritettävä kimmomoduulin kaava voidaan esittää ja sieventää seuraavasti:

$$E = \frac{\sigma_{tx}}{\varepsilon} = \frac{\frac{8D_1(L - L')}{\pi * (D_1^4 - D_2^4)} F}{\frac{6D_1(L - L')\Delta s}{L^3 - 3L(L')^2 + 2(L')^3}} = \frac{4(L^3 - 3L(L')^2 + 2(L')^3)}{3\pi(D_1^4 - D_2^4)} * \frac{F}{\Delta s}$$

missä  $E$  = kimmomoduuli [ $N/mm^2$ ]

$\sigma_{tx}$  = taivutusjännitys x-akselin suhteen [ $N/mm^2$ ]

$\varepsilon$  = putken poikkileikkauksen maksimivenymä nelipistetaivutuksessa

$D_1$  = putken ulkohalkaisija [mm]

$D_2$  = putken sisähalkaisija [mm]

$L$  = alempi taivutusväli [mm]

$L'$  = kuormitusväli [mm]

$\Delta s$  = taipuma [mm]

$F$  = voima [N].

[10, 13.]

### **3 Materiaalintestauslaitteen käyttöönotto**

#### **3.1 Laitteen ominaisuudet**

Muovikomposiittien valmistajan rooli koko tuotteen elinkaaren kannalta on merkittävä, sillä valmistajien vastuulla on huolehtia monen muun asian ohella kestävyyydestä ja tasaisesta laadusta. Laadun varmistamiseksi on usein testaamalla todennettava, että tuotteet täyttävät asiakkaiden ja standardien asettamat vaatimukset. Tätä tarkoitusta palvellen tehtaan tuotannon testaukseen ollaan ottamassa käyttöön uusi testauslaite.

Laitteen ulkomuoto on nähtävissä liitteessä 1 olevasta kuvasta. Laitteen kuormituskapasiteetti on 50 kN ja sillä voidaan ajaa taivutustestien lisäksi veto- ja puristustestejä, mikäli käytettävissä on asianmukaiset jigit. Kuormituspään liikuttamisen voimansiirto on toteutettu kuularuuveilla, joten liikkeet ovat välyksettömiä ja tarkkoja. Voima-anturi mittaa voiman suuruuden valmistajan tietojen mukaan  $\pm 0,5\%$ :n tarkkuudella ja mittaustiheys voidaan asettaa parhaimmillaan 1 millisekuntiin, mikä vastaa 1000 Hz mittaustaajuutta. Laitteen edut ja ominaisuudet ovat parhaiten käytettävissä, kun sitä ohjataan tietokoneohjelmasta käsin. Ohjaaminen onnistuu myös laitteeseen kiinnitetyllä ohjauspaneelilla, jolloin tietokoneen ei välttämättä tarvitse olla kytkettynä. Tällöin testausohjelmat tulee olla ladattuina laitteen omaan muistiin. [15.]

Testattavat tuotteet ovat pultruusiomenetelmällä valmistettavia lasikuitu- ja hiilikuituputkia, joiden ulkohalkaisijat vaihtelevat noin 10 millimetristä 50 millimetriin. Koejärjestely, jolla näitä tuotteita on ennen testattu, näkyy liitteessä 2. Aikaisemmasta menetelmästä poiketen uudella laitteella taivutuskuormitus saadaan aikaan painamalla alaspäin.

## 3.2 Koejärjestely putken taivutustestaukseen

### 3.2.1 Taivutusvälit

Laitteeseen oli hankittu portaattomasti säädettävät taivutustuet, joissa säätövaraa on reilusti. Tämä antaa mahdollisuuden testata hyvin monilla eri taivutusväleillä. Taivutusvälien valinnassa ja ensimmäisiä testejä tehtäessä lähdettiin liikkeelle vanhassa laitteessa käytössä olleilla taivutusväleillä: alatukien väli oli 800 mm ja ylätukien väli 105 mm.

Taivutusvälit tulee valita siten, että niitä tarvitsisi muuttaa mahdollisimman vähän, vaikka näytteiden mitat vaihtuvatkin. Taivutusvälit määritellään usein testausstandardeissa. Komposiittiputkien taivutustestaukseen ei ole kuitenkaan suoraan standardia, joten taivutusvälin valinnassa tai sitä muutettaessa on sovellettava muita komposiittiprofiileja koskevia standardeja. Standardi D8096-17 määrittelee taivutusmenetelmän näytteille, joiden poikkileikkaus on kahdessa suunnassa symmetrinen geometrisen painopisteensä suhteen. Muotonsa puolesta putki on siis kyseisen standardin mukainen näyte. Määritelty testausmenetelmä on kuitenkin kolmipistetaivutus, joten suoraan sitä ei voi soveltaa, koska nyt on kyseessä nelipistetaivutus. Standardissa annettu alemman taivutusvälin ja näytteen korkeuden suhdeluku on  $20 \leq L/h \leq 32$ . Valitaan esimerkkitapauksiksi putket, joiden halkaisijat ovat 15 mm, 25 mm ja 35 mm. Taivutusvälin minimiarvoiksi saadaan siten:

$$L_{15,min} = 20 * 15 \text{ mm} = 300 \text{ mm}$$

$$L_{25,min} = 20 * 25 \text{ mm} = 500 \text{ mm}$$

$$L_{35,min} = 20 * 35 \text{ mm} = 700 \text{ mm}$$

Vastaavasti maksimiarvoiksi saadaan:

$$L_{15,max} = 32 * 15 \text{ mm} = 480 \text{ mm}$$

$$L_{25,max} = 32 * 25 \text{ mm} = 800 \text{ mm}$$

$$L_{35,max} = 32 * 35 \text{ mm} = 1120 \text{ mm}$$

Standardin ISO 14125 mukainen ohjearvo alemman taivutusvälin ja näytteen korkeuden suhdelluvulle on 40,5. Standardi koskee poikkileikkaukseltaan suorakulmion muotoisen kappaleen nelipistetaivutusta eli tätäkään ei voida suoraan soveltaa putken taivutukselle [11]. Edellä valituille esimerkkikappaleille sopivat taivutusvälit ovat:

$$L_{15} = 40,5 * 15 \text{ mm} = 607,5 \text{ mm}$$

$$L_{25} = 40,5 * 25 \text{ mm} = 1012,5 \text{ mm}$$

$$L_{35} = 40,5 * 35 \text{ mm} = 1417,5 \text{ mm}$$

[11.]

Standardien ohjearvoja hyödyntäen voidaan arvioimalla tehdä suuntaa antava rajausta putken nelipistetaivutukseen sopivalle alemman taivutusvälin ja näytteen korkeuden suhteelle:

$$25 \leq \frac{L}{D_1} \leq 40$$

missä  $L$  = alempi taivutusväli [mm]

$D_1$  = putken ulkohalkaisija [mm].

Tämän tarkempaa rajausta ei ole mielekästä tehdä, eikä sille toisaalta ole tarvettakaan, koska testauksen toleranssit eivät ole kovin tarkat. Näiden raja-arvojen perusteella voidaan laskea suuntaa antavat rajat putken halkaisijalle, kun alempi taivutusväli on 800 mm.

$$\frac{800 \text{ mm}}{40} \leq D_1 \leq \frac{800 \text{ mm}}{25}$$

$$20 \text{ mm} \leq D_1 \leq 32 \text{ mm}$$

Koeajossa, johon näytteet valittiin satunnaisesti, halkaisijat vaihtelevat arvosta 11,2 mm arvoon 35 mm (liite 3). Näytteiden halkaisijoiden keskiarvo on noin 25,5 mm, ja vain yhden halkaisija on alle 20 mm. Kokemuksen perusteella testattavana olevien putkien halkaisijat ovatkin harvemmin alle 15 mm tai yli 35 mm. Näin ollen edellä määritellyt putken ulkohalkaisijan rajat vastaavat riittävän hyvin vaatimuksia.

Laskettujen arvojen perusteella käytössä ollut 800 millimetrin taivutusväli vaikuttaa varsin hyvältä ratkaisulta, mikäli halutaan valita yksi yhteinen taivutusväli kaikille tuotteille. Kun alemmaksi taivutusväliksi on valittu 800 mm, määräytyy kuormitusväli eli ylempi taivutusväli standardissa ISO 14125 esitetyn kaavan mukaisesti:

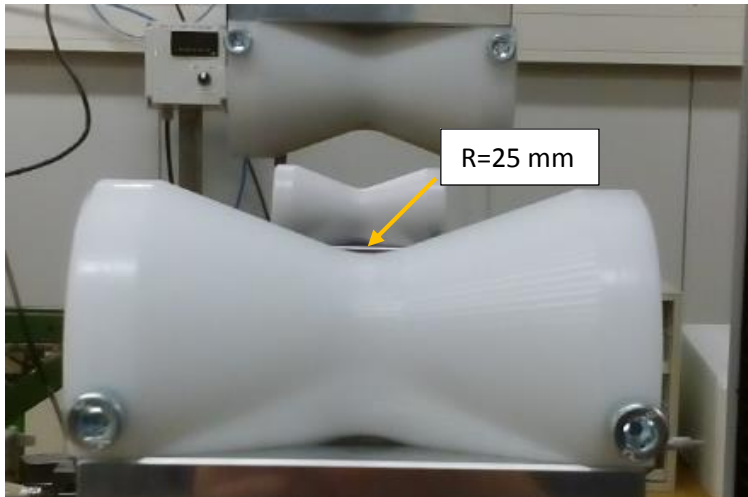
$$L' = \frac{L}{3} = \frac{800 \text{ mm}}{3} \approx 266,7 \text{ mm}$$

missä  $L'$  = kuormitusväli  
 $L$  = alempi taivutusväli.

[11.]

### 3.2.2 Taivutustukien päät

Laitteelle on toistaiseksi käytettävissä vain poikkileikkaukseltaan pyöreiden tankojen tai putkien taivutukseen sopivat taivutustukien päät, joiden muodot näkyvät kuvioista 7. Lovetun muotonsa ansiosta näiden tukirullien päälle näytteen asettaminen on helpompaa kuin esimerkiksi suoran ympyrälieriön muotoisen tuen päälle. Kun kyseessä on pyöreä kappale, joka voi helposti pyörähtää pois tukien päältä, on tällainen muoto erityisen hyödyllinen jo turvallisuudenkin kannalta. Taivutustukien muodot ja mitat ovat nähtävissä tarkemmin liitteessä 4 olevasta piirustuksesta. Vanhassa laitteessa käytetyn jigin tukirullat olivat muodoltaan, mitoiltaan ja materiaaliltaan hieman erilaiset. Ne ovat lisäksi kuluneet ajan myötä esimerkiksi siten, että niiden kontaktipinnat ovat tasoittuneet, jolloin niiden kosketuspinta-alat ovat kasvaneet. Koska näytteen murtuminen ajateltiin tapahtuvan kuormituspäiden välisellä osuudella, ei tukien päiden muodolla uskottu olevan suurta merkitystä tulosten kannalta. Rullien materiaaleiksi oli valittu polyasetali ja nylon, joiden kitkakertoimet terästä vasten ovat luokkaa 0,25–0,35 eli verrattain pieniä [10]. Tämän perusteella kitkakertoimet lienevät samaa luokkaa myös testattavien materiaalien kohdalla, joten kitkan vaikutus tuloksiin saadaan minimoitua näillä materiaalivalinnoilla.



Kuvio 7. Testauslaitteessa käytössä oleva taivutustukirulla, johon on merkitty kontaktipinnan kaarevuus.

Koska tukirullan kaarevuussäde leveyssuunnassa on kuvion 7 mukaisesti 25 mm, se sopii periaatteessa putkille, joiden ulkohalkaisija on korkeintaan 50 mm. Näin ollen se kattaa melkein kaikki tehtaalla tuotettavat putket. Yli 50 millimetrinen putkien tapauksessa tuenta muuttuu siten, ettei tukirullan pohjan pyöristetty osa enää tue näytekappaletta kunnolla, mikä voi vaikuttaa hieman tuloksiin. Toisaalta alle 50-millimetrinen näyte ei myöskään tukeudu täydellisesti kyseistä pyöristystä vasten. Kapeimmalta kohdaltaan rullan halkaisija on noin 46,8 mm (liite 4). Standardin D8069-17 mukaan kaarevuussäteen tuli olla noin kaksikertainen näytteen paksuuteen eli putken tapauksessa ulkohalkaisijaan nähden [12]. Koska  $46,8 \text{ mm} / 2 = 23,4 \text{ mm}$ , rullan halkaisija sopii varsin hyvin, kun oletetaan koeajonerän tavoin näytteiden halkaisijaksi keskimäärin 25,5 mm.

### 3.3 Ohjelma nelipistetaivutukselle

Testausohjelmaa tehdessä määritetään käytettävä koestusmenetelmä sekä valitaan asetukset, joilla testit ajetaan. Vaihe on merkittävä tällaisessa tapauksessa, jossa otetaan käyttöön pitkälle automatisoitu testauslaite. Kun parametrit ja asetukset on saatu säädettyä kohdalleen, testien ajo onnistuu parhaimmillaan vaivattomasti, periaatteessa vain käynnistysnappia painamalla. Tärkeimpänä tavoitteena tässä työssä on tehdä määrittäminen siten, että saadaan tulokset maksimivoimasta, maksimijännityksestä ja kimmomoduulista suorittamalla putken nelipistetaivutus.

Ohjelmalla saadaan selvitettyä myös monia muita suureita. Ohjelman tekemisestä on laadittu osana tätä opinnäytetyötä yleisluontoiset ohjeet, jotka löytyvät liitteestä 5. Ohjelman käytöstä testejä tehtäessä on ohjeet liitteessä 6.

### **3.3.1 Testin aloituskohta**

Kuten aiemmin on todettu, testattavien putkien halkaisijat vaihtelevat. Oletuksena oli, että 50 mm on suurin testattava halkaisija. Kuormituspään sijainti eli korkeus ennen testin aloitusta asetettiin siten, että 50 millimetriä paksu putki sopii helposti taivutustukien ja kuormituspään jatkona olevien rullien väliin. Välyksestä ei ole haittaa ja suositeltavaa onkin jättää selkeä välys mieluummin, kuin että tila jää liian ahtaaksi. Kuormituspäätä voi kuitenkin helposti liikuttaa manuaalisesti ohjauspaneelista käsin, joten esimerkiksi selvästi ohuempaa putkea testattaessa voidaan kuormituspäätä ajaa sopivalle korkeudelle ennen testausohjelman käynnistämistä.

Aloituspiste oli määritettävä ohjelmaan siten, että taipuman arvo kyseisessä pisteessä on nolla. Näin taipuma saadaan mitattua oikein testien aikana. Aloituspisteen määrittäminen toteutettiin ottamalla käyttöön esikuormitustoiminto. Toiminnoissa kuormituspäätä ajetaan määrätyllä nopeudella kohti näytettä niin kauan, kunnes välys on hävinnyt ja näytteeseen kohdistuu määrätyn suuruinen kuorma. Esikuormituksen arvoksi valittiin 5 N ja nopeudeksi 150 mm/min. Kuorman täytyessä kuormituspään siirtymän arvo eli tässä tapauksessa taipuman arvo nollaantuu. Kyseisellä nopeudella esikuormituksen hakeminen tapahtuu yleensä muutamassa sekunnissa ja testiajo on heti tämän jälkeen valmis alkamaan. Nopeutta voidaan myös säätää suuremmaksi tai pienemmäksi.

### **3.3.2 Testausnopeus**

Standardin mukaan nelipistetaivutuskokeessa käytettävä kuormituspään nopeus voidaan määrittää laskennallisesti siten, että venytysnopeuden  $\epsilon'$  arvoksi tulisi asettaa 0,01 1/min eli 1 prosentti minuutissa.

$$v = \frac{\varepsilon' L^2}{4,7h}$$

missä  $\varepsilon'$  = venytysnopeus [1/min]  
 $L$  = alempi taivutusväli [mm]  
 $h$  = näytteen paksuus [mm].

[11.]

Sovelletaan kaavaa putken muotoiselle kappaleelle. Näytteen paksuus vastaa nyt putken ulkohalkaisijaa eli  $h = D_1$ . Alemman taivutusvälin pituus olkoon 800 mm, kuten aiemmin päätettiin. Lasketaan, millaiset nopeudet tulee valita, jos testattavana olevan putken ulkohalkaisija on 15 mm, 25 mm tai 35 mm:

$$v_{15} = \frac{0,01 \frac{1}{\text{min}} * (800 \text{ mm})^2}{4,7 * 15 \text{ mm}} \approx 90,8 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

$$v_{25} = \frac{0,01 \frac{1}{\text{min}} * (800 \text{ mm})^2}{4,7 * 25 \text{ mm}} \approx 54,5 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

$$v_{35} = \frac{0,01 \frac{1}{\text{min}} * (800 \text{ mm})^2}{4,7 * 35 \text{ mm}} \approx 38,9 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$$

Kaavasta huomataan, että nopeuden arvo on kääntäen verrannollinen putken halkaisijaan. Tästä seuraa, että halkaisijaltaan suurempaa putkea tulisi taivuttaa selvästi pienemmällä nopeudella. Nopeuden vaihto on mahdollista toteuttaa tekemällä eripaksuisille tuotteille omat testausohjelmansa ja valitsemalla kullekin tuotteelle sopiva ohjelma aina testin alussa.

Mikäli tavoitteena on, että kaikki putket saadaan testattua samaa nopeuden arvoa käyttäen, voidaan venymän kasvukertoimesta joustaa hieman. Näin saadaan vaihtoehtoinen testaustapa, joka nopeuttaisi testausprosessia. Käyttöön otettavan testauslaitteiston mittaustiheys on niin korkea, ettei nopeuden nostaminen varmasti sen puolesta aiheuta virhettä mittaustuloksissa.



Aiemmin käytössä olleella nelipistetaivutuslaitteella oli testattu kaikki putket nopeudella 80 mm/min. Lasketaan, mikä venymän kasvukerroin  $\varepsilon'$  olisi, jos ajetaan 35-millinen putki kyseisellä nopeudella.

$$\varepsilon' = \frac{4,7hv}{L^2} = \frac{4,7 * 35 \text{ mm} * 80 \frac{\text{mm}}{\text{min}}}{(800 \text{ mm})^2} \approx 0,021 \frac{1}{\text{min}}$$

Saatu tulos tarkoittaa siis noin 2,1 % venymää minuutissa. Tulos vaikuttaa varsin kohtuulliselta, ja se tuskin vaikuttaa testien tuloksiin merkittävästi, koska näytteiden ja taivutusvälien mitat ovat verrattain suuret. Tämän lisäksi vanhalla testauslaitteella, jossa kyseistä nopeutta käytettiin, päästiin hyviin tuloksiin.

### 3.3.3 Taivutusjäykkyys

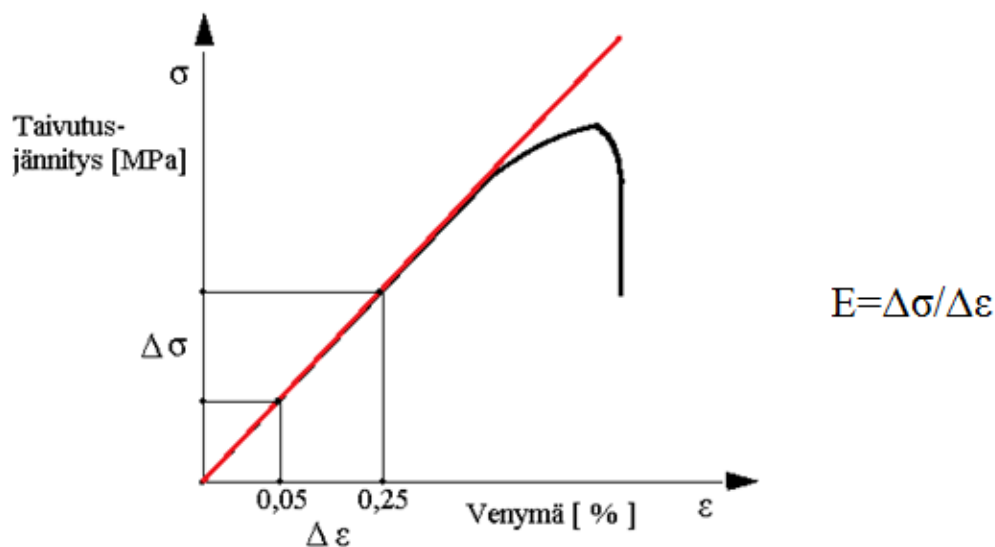
Ennen testikappaleen jäykkyys mitattiin kolmipistetaivutuksella, jossa kappaleen keskikohtaan kohdistettiin määrätyn suuruinen pistekuorma ja katsottiin taipuman suuruus. Tavoitteena on kuitenkin uuden laitteen hankinnan myötä määrittää taivutusjäykkyys laskemalla kimmomoduuli. Laskenta toteutuu automaattisesti, kunhan ohjelmaan on määritetty sopivat parametrit. Etuna vanhaan menetelmään verrattuna on se, että samalla nelipistetaivutuksella ja vieläpä samalla testauskerralla saadaan mitattua sekä taivutuslujuus että jäykkyys.

Kimmomoduulin määrittämiseen ohjelma tarjoaa useita toisistaan hieman poikkeavia tapoja, jotka kaikki perustuvat jännityksen ja venymän suhteen muutokseen lineaariselastisella alueella. Lineaariselastinen alue on komposiittimateriaaleilla suhteellisen laaja, joten parametreiksi asetettavien venymien raja-arvojen sijoittaminen ei sen puolesta ole kovin tarkkaa. Ajetujen putkien taivutustestien perusteella venymän maksimiarvot ovat lasikuituputkillä noin 0,5 %– 1 %. Standardin ISO-14125 perusteella venymän rajoiksi asetettiin:

$$\varepsilon_1 = 0,05 \% \text{ ja } \varepsilon_2 = 0,025 \%$$

missä  $\varepsilon_1$ = alempi venymän raja-arvo [%]  
 $\varepsilon_2$ = ylempi venymän raja-arvo [%].

Näiden rajojen perusteella ohjelma laskee venymän muutosta  $\Delta\varepsilon$  vastaavan taivutusjännityksen muutoksen  $\Delta\sigma$ . Jännityksen ja venymän suhteesta lasketaan edelleen kimmomoduuli (kuvio 8). Luvussa 2.5.3 esitettiin kimmomoduulin laskukaava, jota myös testausohjelma käyttää. Kaavasta saatiin erotettua kerroin  $F/\Delta s$ , joka kuvaa kuorman suhdetta taipumaan. Mikäli ei pystytä selvittämään venymää ja jännitystä, voidaan kimmomoduuli laskea myös sijoittamalla kaavaan mitattu taipuman muutos ja sitä vastaava voiman muutos.



Kuvio 8. Kimmomoduulin määrittäminen jännitys/venymä -kuvaajan avulla esitettynä. Punainen viiva esittää lineaariselastisen alueen kulmakerrointa.

### 3.3.4 Taivutuslujuus

Toisin kuin vanhalla taivutuslujuuden mittaamenetelmällä, uudella testauslaitteella on mahdollista määrittää näyttemateriaalin myötölujuus. Komposiittien taivutuskuormituksessa voiman arvossa ei kokemusten perusteella tapahdu minkäänlaista notkahdusta, joten ylempää ja alempaa myötörajaa ei voida erottaa. Laitteen mittaustarkkuus on kuitenkin sen verran hyvä, että huonomminkin erottuva myötämisen vaihe voidaan kuorma/venymä -kuvaajasta tai muista tuloksista nähdä.

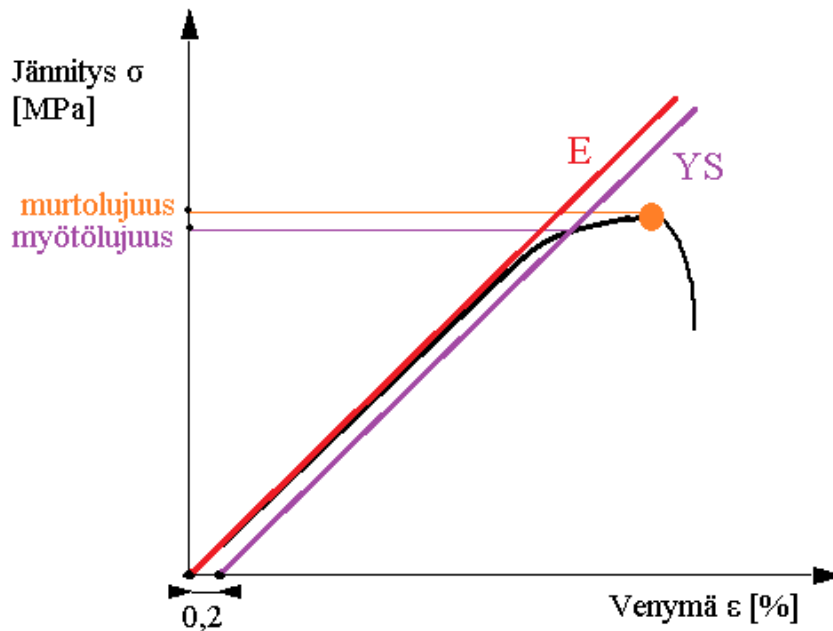
Graafisesti tarkasteltuna myötäminen havaitaan silloin, kun jännitys/venymä-kuvaaja leikkaa suoran YS kuviossa 9 esitetyllä tavalla. Jännitys/venymä-kuvaajassa tai voima/taipuma-kuvaajassa

jassa myötö voidaan havaita kaartuvana muotona hieman ennen voiman tai jännityksen maksimiarvoa. Tällöin venymä ei enää suurene suoraan verrannollisesti kuorman kasvaessa eli on siirrytty pois lineaariselastiselta alueelta. Kuvaaja kaartuu siten, että jännityksen arvon kasvu hidastuu suhteessa venymään. Suora YS sijoittuu kuviossa nähtävällä tavalla siten, että se on yhdensuuntainen kuvaajan lineaariselastisen osan ja samalla kimmomoduulia kuvaavan suoran E kanssa.

Suoran YS alkupisteeksi on valittava jokin venymän arvo. Kyseinen arvo asetetaan myös testausohjelmaan parametriksi. Näin säädetään myötön havaitsemisen herkkyys. Mitä pienemmäksi parametrin myötövenymän arvo asetetaan, sitä herkemmin ohjelma havaitsee myötörajan. Asetusta ei pidä säätää liian herkälle, koska tällöin myötö voidaan havaita liian aikaisin. Vaikka raja asetetaan hyvinkin pieneksi, kaikille komposiittituotteille ei mekaanisten ominaisuuksiensa vuoksi myötölujuutta pystytä määrittämään. Eräs yleisesti käytetty ohjearvo on 0,2 %, joten se valittiin alustavasti testausohjelman parametrin arvoksi. Määrittämisprosessia havainnollistaa kuvio 9.

Tehtyjen komposiittiputkien taivutustestien perusteella jännitys suhteessa venymään kasvaa suoraviivaisesti lähes maksimiarvoonsa eli taivutuslujuuteen asti. Lähinnä lasikuitulujitteisilla tuotteilla voi esiintyä pieni myötämisen vaihe juuri ennen murtorajaa. Tämä kertoo siitä, että lasikuitu on lujitteena hieman hiilikuitua sitkeämpää. Hiilikuitulujitetuilla tuotteilla myötörajaa on nimittäin usein miltei mahdoton erottaa tarkimmillakaan voima-antureilla tai korkeimmillakaan mittaustajuuksilla. Voi myös olla, ettei myötöä yksinkertaisesti tapahdu ollenkaan.

Vanhalla laitteella testattaessa murtolujuus mitattiin maksimivoimana. Tämä on mahdollista uudellakin laitteella, mutta lisäksi sillä saadaan määritettyä murtolujuus maksimijännityksen arvona (kuvio 9). Vaikka myötöraja on usein hankala erottaa hiili- ja lasikuituputkien testauksessa, on murtoraja aina nähtävissä selkeästi. Jännitys/venymä-kuvaajassa murtumiskohta näkyy tyypillisesti terävänä piikkinä. Ohjelman asetuksista voidaan valita siirtymälle haluttu ylä- ja alaraja, joiden välistä ohjelma hakee voimalle ja sitä kautta taivutusjännitykselle maksimiarvot. Tässä käyttöohjeessa valittiin kuitenkin tarkkailualueeksi koko alue kuormituksen nollapisteestä murtumaan asti, koska tiedetään, että tämän tyyppisissä testeissä voiman ja jännityksen huippukohdat erottuvat selkeästi.



Kuvio 9. Myötölujuuden ja murtolujuuden määrittäminen. Myötölujuus mitataan 0,2 % myötövenymää vastaavasta kohdalta.

### 3.3.5 Taipuma ja venymä

Testausohjelmaa käyttäen taipuman selvittäminen on yksinkertaista. Ohjelma mittaa kuormituspään etäisyyttä taipuman nollapisteestä, ja kun materiaalin määrätty testauksen vaihe, esimerkiksi tai murtolujuus on saavutettu, ohjelma tallentaa tiedon taipumasta automaattisesti. Komposiittien testauksessa taipuma on mahdollista määrittää automaattisesti ainakin murtorajan kohdalla, koska se erottuu selkeästi. Lisäksi ohjelmassa on toiminto, jolla taipuma tai venymä voidaan manuaalisesti määrittää piirretystä voima/taipuma-kuvaajasta tai jännitys/venymä-kuvaajasta. Putken poikkileikkauksessa esiintyvä suurin venymä lasketaan mitatun taipuman perusteella käyttäen luvussa 2.5.3 esitettyä kaavaa.

Venymä ja taipuma ovat ennen muuta suureita, joiden funktiona muun muassa voimat ja jännitykset ilmaistaan. Nämä muodonmuutosta kuvaavat suureet voivat myös itsessään tarjota hyödyllistä tietoa materiaalin käyttäytymisestä. Taipuma voi olla yksi seurattavista asioista etenkin maksimikuorman eli murtolujuuden kohdalla saavutettuja taipuman arvoja tarkasteltaessa. Tietoja voidaan käyttää esimerkiksi eri tuotteiden tai yhden tuotteen eri versioiden vertailuun ja laadun tarkkailuun.

### 3.3.6 Materiaalin pettäminen

Testausohjelmasta otettiin käyttöön automaattinen tunnistustoiminto, jolla materiaalin pettäminen havaitaan. Tarjolla on kolme eri parametria, joista käyttäjä voi valita haluamansa. Tässä tapauksessa parametrien arvot valittiin seuraavasti:

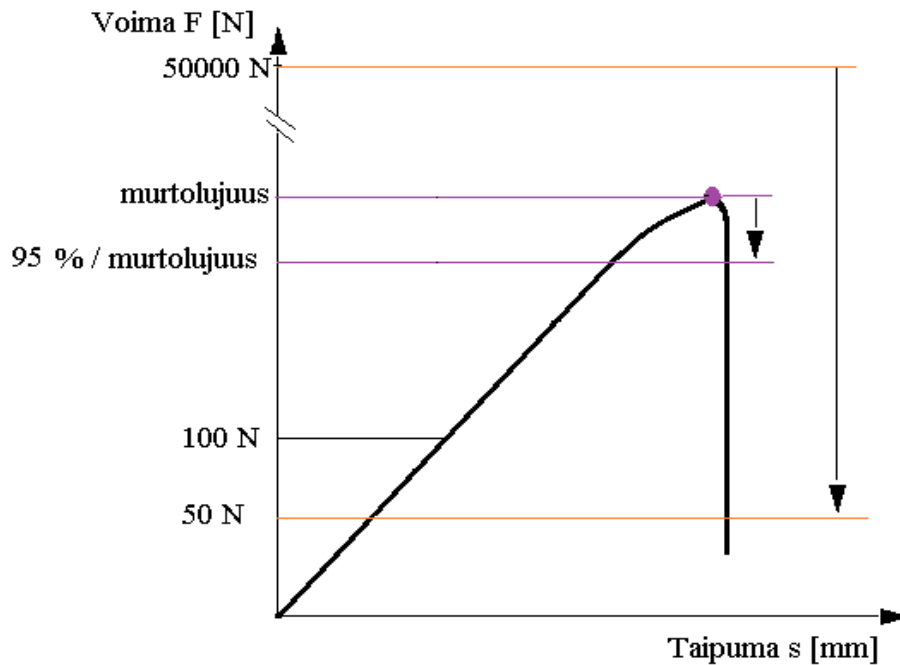
Ensimmäisessä parametrissa toiminto aktivoituu, kun voiman arvo putoaa kuviossa 10 esitetyllä tavalla valittuun 0,1 prosenttiin laitteen kuormituskapasiteetista eli 50 kN:sta. Näin rajan arvoksi saatiin:

$$0,001 * 50000 \text{ N} = 50 \text{ N}.$$

Tätä parametria varten asetettiin kuvion 10 mukaisesti raja, jossa tunnistustoiminto aktivoituu. Näin varmistetaan, ettei hajoamista tunnisteta liian aikaisin testin alkuvaiheessa, jolloin voiman arvo on pieni. Raja asetettiin arvoon 0,2 %:

$$0,002 * 50000 \text{ N} = 100 \text{ N}.$$

Toisessa parametrissa arvo putoaa maksimiarvon eli kuvioon 10 merkityn murtolujuuden jälkeen ja saavuttaa valitun 95 %:n rajan. Kolmas tapa, jolla kuormituksen arvon pieneneminen suhteessa taipumaan voidaan tunnistaa, on voima/taipuma -kuvaajan laskunopeus. Tämä tapahtuu siten, että kun kuvaaja kaartaa alaspäin tarpeeksi jyrkästi kappaleen rikkoutumisen seurauksena, toiminto aktivoituu.



Kuvio 10. Testauslaite tunnistaa materiaalin pettämisen, kun voiman arvo laskee 95 prosenttiin murtolujuuden arvosta tai 0,1 prosenttiin laitteen kapasiteetista (50 kN).

Ideana on, että jokin edellä mainituista parametreista aktivoi tunnistustoiminnon. Todennäköisesti näillä parametrien asetuksilla komposiittien testauksessa saavutetaan ensimmäisenä 95 prosentin raja murtolujuuteen nähden. Mikäli käy niin, ettei millään edellä mainituista parametreista havaita rikkoutumista, ohjelma määrittää rikkoutumisen tapahtuneen viimeisen 100 millisekunnin aikana ennen kuin kuormitustila häviää kokonaan. Tämän jälkeen lisäasetuksista valittiin vielä, että kuormituspää palautuu takaisin aloituspisteeseen automaattisesti sen jälkeen, kun näytteen rikkoutuminen on havaittu. Näin testausprosessi on käyty läpi.

Muovikomposiittiputkille ja profiileille tehtävien taivutusten tapauksessa rikkoutumisvoima on usein sama kuin murtoraja, koska materiaali pettää ja jopa katkeaa kokonaan murtumisvaiheessa. Tällöin pettämiskohtaa ei välttämättä havaita erikseen, mutta voiman ja taipuman arvot voidaan lukea murtopisteestä. Jos taas murtumisen jälkeistä venymistä tapahtuu vähänkin, ohjelma pystyy havaitsemaan materiaalin lopullisen pettämisen vaiheen. Muovikomposiittirakenteen pettämisen on tyypillistä, että maksimikuorman saavuttamisen jälkeen venymistä ei juuri tapahdu, vaan voiman ja samalla jännityksen arvo putoaa romahtaen.

### 3.4 Koeajon suorittaminen ja tulokset

Kun ohjelma putkien nelipistetaivutukselle oli saatu luotua, sen sopivuutta testattiin koeajolla ja tämän jälkeen verrattiin taivutustesteissä saatuja murtolujuuksia vanhojen tilastoitujen tulosten keskiarvoihin (liite 3). Koeajoon valittiin satunnaisesti 13 näytettä tehtaalla valmistetuista putkista. Käytössä olivat vanhat taivutusvälit eli 800 mm ja 105 mm, jotta tuloksista saatiin vertailukelpoisia. Keskiarvot löytyivät toimeksiantajan tilastoista, joihin kunkin tuotteen taivutuslujuudelle oli määrätty myös alarajat. Saadut tulokset vastasivat jokseenkin vanhoja tuloksia. Kuitenkin testatuista 13 näytteestä neljässä havaittiin yli 20 % poikkeama aiempien tulosten keskiarvoon nähden. Testatuista näytteistä kahden murtolujuudet jäivät määrätyn alarajan alle, jolloin 11 näytteen arvot olivat sallituissa rajoissa.

Osittain samoilla näytteillä tehtiin myös taivutusjäykkyyden vertailua, joka on dokumentoituna liitteessä 3. Jäykkyyden määrittämiseen oli ennen käytetty kolmipistetaivutusta mittaamalla näytteiden taipumat määrättyllä taivutusvälillä ja kuormalla. Tätä vertailua varten laskettiin taipumien perusteella kimmomoduulit kaavalla:

$$E = \frac{Fl^3}{48 * s * I_z}$$

missä  $F$ = kuorma [N]  
 $l$ = taivutusväli [mm]  
 $s$ = taipuma [mm]  
 $I_z$ = putken neliömomentti [ $mm^4$ ].

[10.]

Neliömomentti putken muotoiselle kappaleelle lasketaan kaavalla

$$I_z = \frac{\pi(D_1^4 - D_2^4)}{64}$$

missä  $I_z$ = putken neliömomentti [ $mm^4$ ]  
 $D_1$ =putken ulkohalkaisija [mm]  
 $D_2$ =putken ulkohalkaisija [mm].

[10.]

Vertailun perusteella uudella laitteella määritetty kimmomoduuli jäi kolmen hiilikuituputken tapauksessa huomattavasti pienemmäksi vanhalla menetelmällä määritettyihin arvoihin verrattuna. Vertailussa mukana oli 7 näytettä. Näistä yhden näytteen tulos poikkesi noin 47 %, joka on huomattava ero. Yhdessä näytteessä heittoa oli 20 %, mutta loput viisi näytettä vastasivat tuloksiltaan varsin hyvin vanhalla menetelmällä saatuja tuloksia jääden alle 11 prosentin poikkeamaan.

Kolmantena koeajoeränä ajettiin neljän näytteen sarja, johon kuului kaksi lasikuituputkea ja kaksi hiilikuituputkea. Tämän erän tulokset on esitetty liitteessä 3. Tarkoituksena oli kokeilla nelipistetaivutuksen ohjelmaan määritettyjä asetuksia. Myötölujuuden mittauseräparametriksi alustavasti asetettu venymän arvo 0,2 % todettiin liian suureksi. Kokemuksen mukaan myöskään arvolla 0,1 % ei yleensä saada myötölujuutta määritettyä. Niinpä koeajossa käytettiin parametrina 0,02 prosentin venymää ja tällä saatiinkin tulokset kaikista näytteistä.

Kuten liitteessä 3 olevista tuloksista nähdään, koeajossa onnistuttiin määrittämään lisäksi murtolujuus sekä maksimikuormana että maksimijännityksenä. Materiaalin lopullisen pettämisen vaihe määräytyi murtolujuuden perusteella ollen näin 95 prosenttia maksimikuormasta. Kimmomoduulit saatiin selvitettyä käyttäen standardin mukaisia venymän raja-arvoja 0,05 % ja 0,25 %. Niin ikään saatiin tulokset taipumista ja niistä riippuvista venymistä.

Osassa koeajossa ajetuista testeistä näytteen rikkoutuminen tapahtui toivotulla tavalla kuormituspäiden välisellä alueella eli putken yläpinnassa. Jotkut näytteistä pettivät joko yhden tai molempien kuormituspäiden kohdalta. Tämä kertoo siitä, että kuormituspää aiheuttaa näytteeseen kontaktirasituksen ja että jotkut materiaalit kestävät sitä paremmin kuin toiset. Parannusta aikaisempaan testausjärjestelyyn kuitenkin havaittiin siinä, että uusi koejärjestely ja jigi ovat paljon tukevammat, mikä edesauttaa mahdollisimman puhtaan taivutuksen syntymistä ja täten näytteen rikkoutumista halutusta kohdasta.



## 4 Pohdinta

Tässä opinnäytetyössä perehdyttiin testauslaitteen toimintaan standardeja ja materiaaalitekniikka tietoperustana käyttäen. Testausohjelman toimintaa selostettiin putken taivutustestauksen kannalta, joten työn avulla kyseisen aiheen ymmärtäminen on toivottavasti hieman helpompaa. Tulevaisuudessa työtä on mahdollista hyödyntää lisäksi laitteen käytössä, käyttöön opastamisessa ja komposiittiputkien taivutuskokeissa yleensäkin. Tehdyn koeajon tuloksia voidaan vertailla myöhempiin tuloksiin ja vaikkapa muilla testauskokoonpanoilla saataviin tuloksiin. Koska muovikomposiittiputkien nelipistetaivutusmenetelmään ei standardia ole, voidaan tätä työtä periaatteessa käyttää apuna jopa kyseisen menetelmän standardoinnissa.

Testauslaitteen uusimisen myötä komposiittiputkien taivutustestaus kehittyy nykyaikaisemmaksi. Aiemmin mitattiin vain murtolujuus maksimivoimana ja jäykkyys määritettiin erikseen toisella menetelmällä. Nyt murtolujuus saadaan määritettyä automaattisesti sekä voiman että jännityksen yksiköissä ja jäykkyys mitataan kimmomoduulina. Kaikki nämä arvot saadaan samalla ajolla, jonka jälkeen tulokset voidaan lukea ohjelmasta niin lukuarvoina kuin graafisesti. Tuotannon testauksessa, jossa laitetta käytetään, taivutustestejä tehdään useita kymmeniä päivässä, joten testaamisen on oltava sujuvaa. Testin ajo itsessään käykin uudella laitteella varsin nopeasti, mutta tietojen syöttämiseen ja ohjelman käyttöön kuluu hieman aikaa toisin kuin vanhalla manuaalisesti ohjatulla laitteella. Kokonaisuudessaan testausprosessin voidaan todeta tehostuvan huomattavasti uuden laitteen käyttöönoton myötä, koska tietoa saadaan yhdellä testauksella niin paljon enemmän ilman, että työn määrä kuitenkaan enemmälti kasvaa.

### 4.1 Tulokset ja menetelmät

Positiivista koeajossa oli se, että kaikista testeistä saatiin jonkinlaiset tulokset. Oli myös hienoa huomata, että valtaosa testeistä antoi ainakin samaa suuruusluokkaa olevia tuloksia vertailussa vanhoilla menetelmillä ja laitteilla saatuihin tuloksiin. Tämä kertoo siitä, että koko tämän työn keskiössä olleet asiat, kuten testausohjelman ja konkreettisen koejärjestelyn tekeminen saatiin tehtyä onnistuneesti. Laite kokonaisuudessaan voidaan todeta käyttötarkoituksen edellyttämällä tavalla toimivaksi. Tuloksissa havaittuja poikkeamiakaan ei ole syytä pitää pelkästään epäonnistumisina. Pikemminkin ne palvelevat työn tarkoitusta tulevaisuutta ajatellen tuomalla esiin

jatkokehitystä tarvitsevia menetelmiä ja puutteita laitteistossa. Taivutusjäykkyyksien vertailussa yksi selittävä tekijä havaittuihin poikkeamiin on varmaankin taivutusmenetelmän muuttuminen kolmipistetaivutuksesta nelipistetaivutukseen. Näissä kahdessa menetelmässä taivutusmomentit ja leikkausvoimat jakautuvat toisistaan poikkeavalla tavalla. Siksi ei olisi ihme, jos materiaali käyttäytyy toisessa kuormitustyyppissä hieman toisella tavalla kuin toisessa.

Vanhojen tulosten ja tilastojen tarkastelu osoittaa, että pientä ja välillä vähän suurempaakin vaihtelua komposiittiputkien taivutustestien tuloksissa on aina. Tuotantolinjoilla ajoparametrit voivat vaihdella, vaikka tuote nimellisesti pysyykin samana. Tuotannon laatu ei muutenkaan ole aina tasaista. On mahdollista, että joissakin näytteissä esiintyy pieniä huomaamatta jääneitä valmistusvirheitä, kuten vajaaksi jäänyt lujitteen määrä.

Koeajossa testattuja näytteitä oli yhteensä 17, joista jokainen oli eri tuotteesta. Näin pienellä koeajettujen näytteiden otannalla on ymmärrettävää, että suuriakin yksittäisiä poikkeamia syntyy edellä mainituista syistä. Vähän luotettavampia tuloksia olisi voitu saada, jos olisi testattu jokaisesta tuotteesta useampia näytteitä. Näin olisi saatu pienennettyä mahdollisten valmistusvirheiden vaikutusta. Tulosten luotettavuutta paransi kuitenkin se, että vertailuarvoina käytettyjä tuloksia oli useimpien tuotteiden kohdalla tilastoituna paljon, jopa satoja. Laitteella ajettiin lisäksi paljonkin testejä, joita ei tämän koeajon tuloksiin tai muutenkaan tilastoitu. Nämäkin tulokset kertoivat samasta ilmiöstä, joka koeajossa havaittiin: osa tuloksista oli hyvin aikaisempien kaltaisia ja toisissa tuloksissa poikkeamaa tuli jonkin verran.

## 4.2 Jatkokehitys

Tulevaisuudessa on tutkittava, mistä tulosten poikkeamat johtuivat. Voi olla, että vikaa on vanhoissa tuloksissa, ja nyt nykyaikaisemmalla menetelmällä se saatiin tuotua ilmi. Uudelle laitteelle täytyy saada lisää testikertoja alle johtuen esimerkiksi tuotteiden laadun vaihtelusta. Myöhemmin voidaan uudelleen vertailla ja arvioida tuloksien mielekkyyksiä. Asioita joihin huomiota voitaisiin kiinnittää, ovat taivutustukirullien kontaktipintojen aiheuttamat kitkavaikutukset ja paikallisrasitukset. Näitä tekijöitä päästään tutkimaan rullien materiaalien, mittojen ja muotojen kautta. Taivutustestausta voidaan laajentaa tulevaisuudessa käsittämään muitakin profiileja teettämällä uusia taivutustukien päitä esimerkiksi lattaprofiileille.

Tähän liittyen myös päiden kiinnitysmekanismeja pitäisi parantaa siten, että päiden vaihto onnistuu pienemmällä vaivalla. Muunneltavan testausgeometrian vuoksi kolmipistetaivutus on mahdollista nelipistetaivutuksen ohella. Laitteella on taivutusten lisäksi edellytykset suorittaa ainakin veto- ja puristustestejä. Näiden ominaisuuksien laajuutta kannattaa ehdottomasti pyrkiä hyödyntämään tulevaisuudessa. Tämä vaatii uusien jigien hankkimista, testausohjelmien määrittämistä ja testausjärjestelyiden suunnittelua.

Samalla kun uudistuksia tehdään, liitteissä 5 ja 6 olevia ohjeita on tarkennettava ja lisää ohjeita on luotava, jotta laitetta käyttävät pääsevät perehtymään laitteen ja etenkin ohjelman toimintaan. Lisäksi tulosten hallinnassa ja erityisesti tietokantaan tallentamisessa on kehittämisen varaa. Ohjelma mahdollistaa raporttien viemisen suoraan Excel-taulukkoon, joten tämän toiminnon käyttö nopeuttaisi tulosten hallintaprosessia.

### **4.3 Oma oppiminen**

Opinnäytetyöprojektia varten oli perehdyttävä komposiittimateriaalin ominaisuuksiin testauksen kannalta, testauslaitteen käyttöön ja sen ohjelman toimintaan. Olennaisina aihealueina olivat myös ominaisuuksien laskennallinen määrittäminen ja testausstandardit, koska niihin arvojen selvittäminen pitkälti perustuu. Asiantuntemusta kertyi kaikilta näiltä osa-alueilta. Kokonaisuudessaan tämä työ oli hyvä harjoitus. Työn edistäminen tuntui tasaisen haasteelliselta koko projektin ajan, mutta koska tähän vaiheeseen asti on edetty, voi todeta oppineensa jotakin. Työstä saatu osaaminen hahmottuu ja konkretisoituu varmasti tarkemmin tulevaisuudessa.

Laajuudeltaan vastaavia projekteja ei ole aikaisemmin tullut vastaan, joten tässä pääsi ja joutui organisoimaan huomattavasti totuttua enemmän. Samalla opin itsenäistä työskentelyä ja siihen sopivia työskentelytapoja etenkin, kun projektin suorittaminen tapahtui lähes täysin omin voimin. Apua en oikein osannut pyytää, mutta ehkei sille loppujen lopuksi ollut tarvettakaan. Luontevammalta tuntui selvittää ja toteuttaa asiat omalla tavallani. Sen verran aikaa ja energiaa tähän työhön kului, että uskon työn aiheen lähestymistapojen ja näkökulmien olleen tarpeeksi monipuolisia itsenäisestä työskentelytavasta huolimatta.

## Lähteet

1. Exel Group World Wide. History. [Viitattu 19.4.2018]. <http://www.exelcomposites.com/en-us/english/investor/en/corporateinformation/history.aspx>
2. Exel Group World Wide. Exel Composites in brief. [Viitattu 19.4.2018]. <http://www.exelcomposites.com/en-us/english/investor/en/corporateinformation/exel-compositesinbrief.aspx>
3. Kytömäki, R. Exel Composites Strategy 2017–2020. [sähköinen julkaisu]. [Viitattu 19.4.2018]. Saatavissa: [http://www.exelcomposites.com/Portals/154/documents/IR/20180216\\_Strategy%20Update%202017-2020%20-%20External.pdf](http://www.exelcomposites.com/Portals/154/documents/IR/20180216_Strategy%20Update%202017-2020%20-%20External.pdf)
4. Exel Group World Wide. Production plants and technologies. [Viitattu 19.4.2018]. <http://www.exelcomposites.com/en-us/english/investor/en/corporateinformation/productionplantsandtechnologies.aspx>
5. Exel Group World Wide. Group structure. [Viitattu 19.4.2018]. <http://www.exelcomposites.com/en-us/english/investor/en/corporateinformation/groupstructure.aspx>
6. Karjalainen 24.4.2018.
7. Shimadzu Corporation. Application Handbook. Materials Testing. [sähköinen julkaisu] Duisburg. 2016. S. 193, 211. [Viitattu 17.5.2018]. Saatavissa: [https://www.shimadzu.eu/sites/default/files/seg\\_3385\\_apphb\\_testing\\_all.compressed.pdf](https://www.shimadzu.eu/sites/default/files/seg_3385_apphb_testing_all.compressed.pdf)
8. Koivisto, K., Laitinen, E., Niinimäki, M., Tiainen, T., Tiilikka, P. & Tuomikoski, J. Kone tekniikan Materiaalioppi. Edita Prima Oy. Helsinki. 2008. S. 218–222. ISBN 978-951-37-5259-0
9. Nuutamo, V. Muovikomposiitit. Luentomateriaali. Karelia-ammattikorkeakoulu. 2018. 19 s.
10. Saarela, O., Airasmaa, I., Kokko, J., Skrifvars, M. & Komppa, V. Komposiittirakenteet. Hakapaino Oy. Helsinki. 2007. ISBN 978-951-9271-28-6.
11. Valtaoja, E. Tekniikan taulukkokirja. Genesis-kirjat Oy. Mikkeli. 2013. S. 270–906. ISBN-978-952-9867-38-7.
12. SFS-EN ISO 14125. Fibre-reinforced plastic composites. Determination of flexural properties. Helsinki. 1998. 18 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.
13. ASTM D8069-17. Standard test method for determining flexural modulus of full section pultruded fiber reinforced polymer composite members with doubly symmetric cross section under bending. West Conshohocken, Pennsylvania. 2017. 5 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.
14. Shimadzu Corporation. Shimadzu Autograph Software. Trapezium X. Instruction Manual. Data Processing Reference. 2016. S.13–222. 349-02789G.
15. Shimadzu Corporation. Shimadzu Autograph Software. Trapezium X. Instruction Manual. Software Reference. 2016. S.88. 349-02788J.
16. Shimadzu Corporation. Shimadzu Autograph. AGS-X Series. High Capacity Model. Instruction Manual. 2013. 148 s. 349-06632A.
17. Eckert, K. V-tukirulla. Mittapiirros. Exel Composites Oyj. 2018.

## **Liitteet**

Liite 1	Kuva käyttöön otetusta laitteesta
Liite 2	Aiemmin käytössä ollut taivutustestauslaite
Liite 3	Koeajon tulokset
Liite 4	Taivutustukirullan mittapiirros
Liite 5	Ohje testausohjelman luomisesta
Liite 6	Ohje testauksesta ohjelmaa käyttäen

**Kuva käyttöön otetusta testauslaitteesta**



**Kuvat vanhasta nelipistetaivutusmenetelmästä Exel Composites Oy:n tehtaalla**



## Käyttöön otetun testauslaitteen koeajon tulokset

## Taivutuslujuusvertailu

Näyte	Lujite	Ulkohalkaisija/si- sähalkaisija	Taivutus- lujuuden vanha keskiarvo	Taivutus- lujuuden mitattu arvo	Poik- keama	Ala- raja	ok/ei ok
		[mm]	[N]	[N]	[%]	[N]	
<b>Putki 1</b>	lasi	23/21,2	497	417	16,17 %	400	ok
<b>Putki 2</b>	lasi	25/22	1157	1118	3,33 %	1000	ok
<b>Putki 3</b>	lasi	22/18	1388	998	28,13 %	1300	ei ok
<b>Putki 4</b>	hiili+lasi	11,2/8,7	476	433	9,09 %	420	ok
<b>Putki 5</b>	hiili	34/31,5	1405	1441	-2,53 %	1750	ei ok
<b>Putki 6</b>	hiili+lasi	21,7/19,7	963	763	20,81 %	700	ok
<b>Putki 7</b>	hiili	26/23,5	1398	1034	26,03 %	1000	ok
<b>Putki 8</b>	lasi	24,7/21,8	1043	966	7,34 %	950	ok
<b>Putki 9</b>	lasi	30/26	2275	1919	15,68 %	1800	ok
<b>Putki 10</b>	lasi	30/26	2131	2075	2,63 %	1800	ok
<b>Putki 11</b>	lasi	30/27	1418	1279	9,80 %	1000	ok
<b>Putki 12</b>	lasi	22/19	977	1032	-5,63 %	900	ok
<b>Putki 13</b>	hiili	22/19,5	1115	756	32,13 %	700	ok



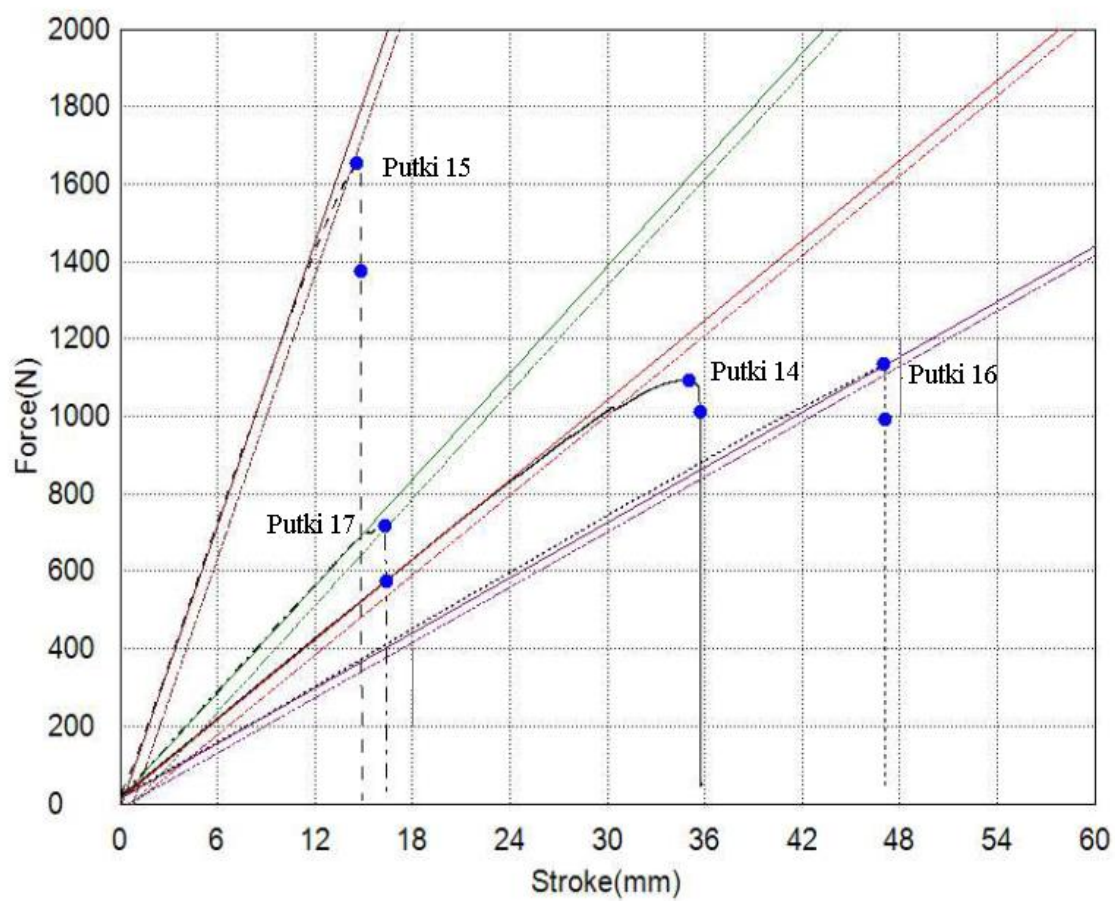
## Käyttöön otetun testauslaitteen koeajon tulokset

## Taivutusjäykkyysvertailu

Näyte	Lujite	Ulkohalkaisija/sisähalkaisija	Neliömomentti	Kimmoduuli vanhalla menetelmällä (3-pistetaivutus)	Kimmoduuli uudella menetelmällä (4-pistetaivutus)	Poikkeama
		[mm]	[mm <sup>4</sup> ]	[Mpa]	[Mpa]	%
<b>Putki 3</b>	lasi	22/18	6346	38255	34648	9,4 %
<b>Putki 4</b>	hiili+lasi	11,2/8,7	491	132207	139057	-5,2 %
<b>Putki 5</b>	hiili	34/31,5	17267	125440	66828	46,7 %
<b>Putki 6</b>	hiili+lasi	21,7/19,7	3491	125564	113680	9,5 %
<b>Putki 7</b>	hiili	26/23,5	7461	110343	87872	20,4 %
<b>Putki 11</b>	lasi	30/27	13673	38626	36025	6,7 %
<b>Putki 13</b>	hiili	22/19,5	4401	106299	94853	10,8 %

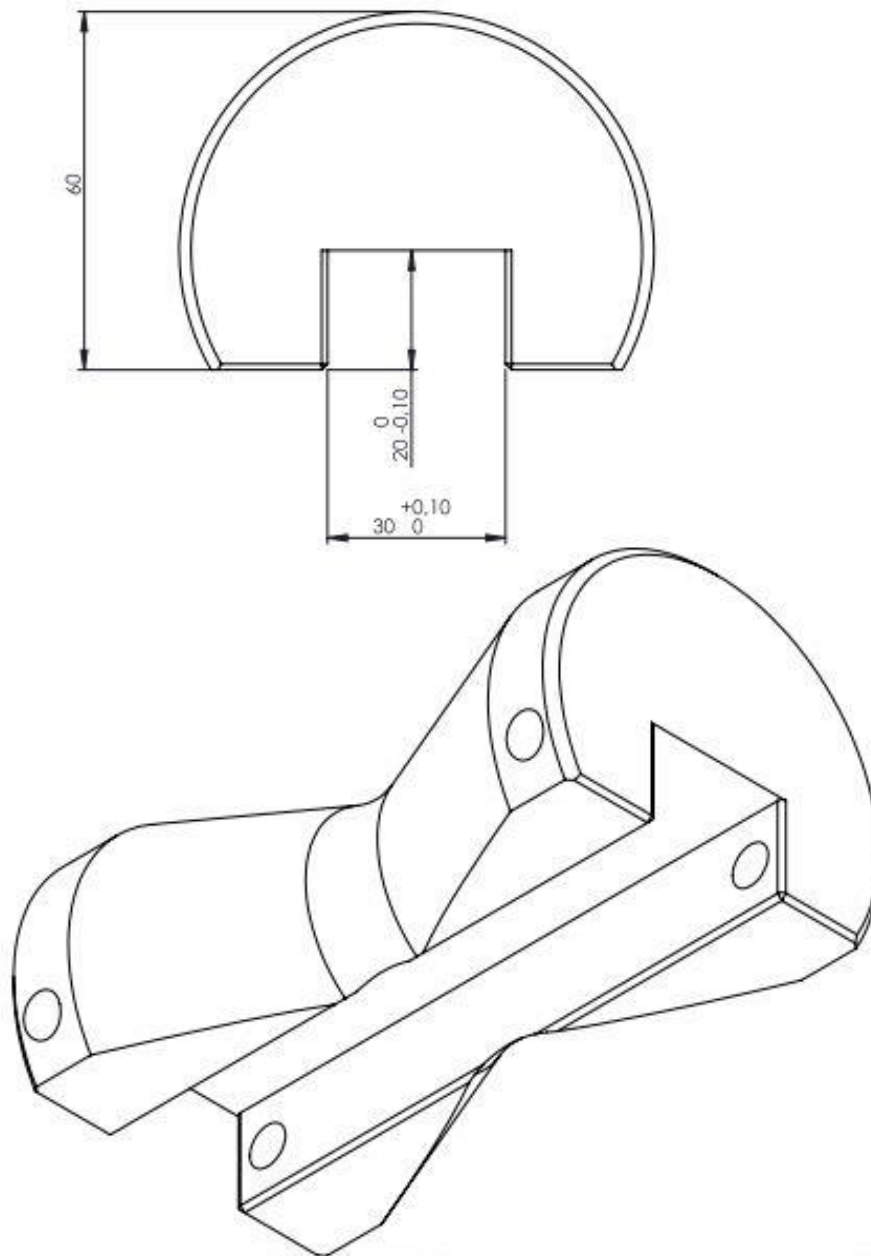
**Käyttöön otetun testauslaitteen koeajon tulokset****Ohjelman koeajo**

<b>Näyte</b>		<b>Putki 14</b>	<b>Putki 15</b>	<b>Putki 16</b>	<b>Putki 17</b>
<b>Lujite</b>		lasi	lasi	hiili	hiili
<b>Ulkohalkaisija/ sisä- halkaisija</b>	[mm]	21/17	35/32,5	23/19	22/19,5
<b>Taivutuslujuus</b>	[N]	1093	1655	1134	718
<b>Materiaalin lopulli- nen pettäminen (95 % taivutuslujuudesta)</b>	[N]	1010	1374	992	575
<b>Max taivutusjännitys</b>	[MPa]	366	266	341	312
<b>Max taipuma</b>	[mm]	35,4	14,5	47,7	16,7
<b>Max venymä</b>	[%]	0,62	0,43	0,92	0,31
<b>Kimmomoduuli (ve- nymä 0,05%-0,25%)</b>	[MPa]	64148	65590	36383	105912
<b>Myötölujuus (venymä 0,02%)</b>	[N]	1018	1609	1108	715

**Käyttöön otetun testauslaitteen koeajon tulokset****Ohjelman koeajo****Putkien 14-17 voima/taipuma kuvaajat**

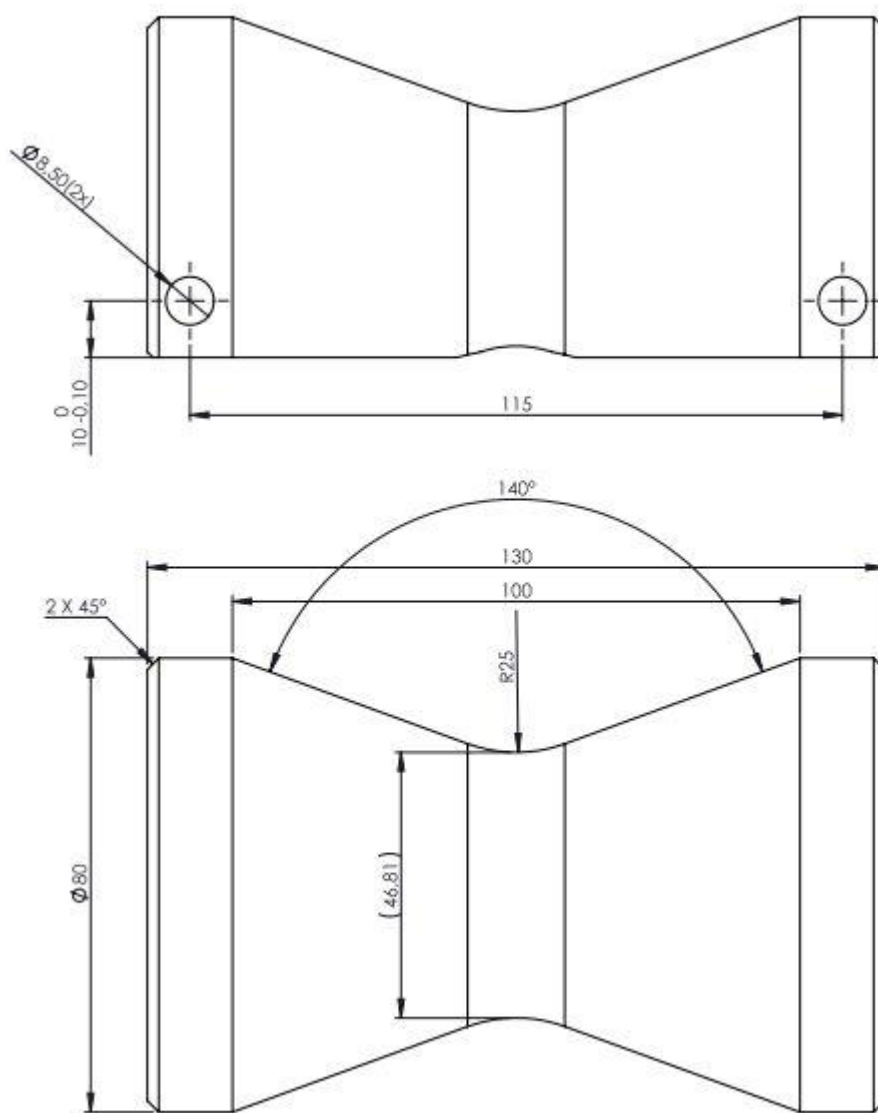
**Taivutustukirullan mittapiirros**

Tekijä: Kenneth Eckert



**Taivutustukirullan mittapiirros**

Tekijä: Kenneth Eckert



## Ohje testausohjelman luomisesta

### Ohjelman luominen

Näihin ohjeisiin on olemassa selventävät kuvat, mutta tekijänoikeussyistä niitä ei tässä opinnäytetyöraportissa esitetä.

Aloitussvalikosta valitaan ”Create new method”.

Olemassa olevaa testiohjelmaa voi muokata valitsemalla ”Open method”.

#### System

1. Valitaan testin tyyppi.
2. Valitaan, onko kuormitus puristusta vai vetoa sekä suunta, johon kuormitus-päätä ajetaan.
3. On mahdollista valita yksiköt ja tulosarvojen pyöristys. Oletuksena ovat SI-yksiköt ja automaattinen pyöristys.
4. Nimetään tarvittaessa käytettävät jiggit, ekstensometrit ja muut lisälaitteet.

#### Sensor

1. Määritellään voiman maksimi- ja minimiarvo. Jos voiman arvo saavuttaa toisen näistä rajoista, kuormituspää pysähtyy ja ohjelma antaa virheilmoituksen.
2. Vastaavasti siirtymän arvolle voidaan syöttää ala- ja yläraja.
3. Välilehdessä voidaan määritellä ekstensometrin, leveysanturin ja muiden anturien asetukset.

#### Testing

Testin ajamiseen voidaan määrittää korkeintaan neljä eri jaksoa sekä niiden väliset siirtymävaiheet. Kun testi suoritetaan alusta loppuun samalla nopeudella ja lineaarisesti kasvavalla kuormituksella, riittää, että ajetaan vain ensimmäinen jakso.

1. Valitaan 1-jakson toiminnoksi kuormitus eli ”load”. Kun valitaan muuttujaksi ”stroke”, voidaan asettaa testausnopeus ja nopeuden yksikkö. Mikäli 1-jakson jälkeen muita toimintoja ei enää suoriteta, asetetaan 1- ja 2-jaksojen siirtymäkohtaan ”off”.

## Ohje testausohjelman luomisesta

2. Kohdasta "disp. origin" valitaan siirtymän (vaaka-akselin) nollakohta. Kun valitaan tähän "elastic," nollakohta on kimmoisan alueen alussa, josta voiman arvo alkaa kasvaa suoraviivaisesti.
3. Pre-Test: Voidaan ottaa käyttöön esikuormitustoiminto, sekä asettaa arvot voimalle ja kuormituspään nopeudelle.
4. Samplings: Valitaan parametri, jonka perusteella asetetaan mittaustiheys. Parametriksi voidaan valita aika, voima, siirtymä
5. End Settings: Kun materiaali murtuu, kuormituksen arvo alkaa pienentyä. Komposiittien tapauksessa rakenne pettää eli kuormitus romahtaa murtumisen jälkeen hyvin nopeasti. Mikäli testattava materiaali venyy vielä murtumisen jälkeen, voidaan asetuksilla määrittää, kuinka pitkään kuormitusta jatketaan. Raja, jossa kuormitus ja testi lopetetaan, määräytyy seuraavien parametrien perusteella:
  - Sensitivity: Kun kuormituksen arvo pienenee tarpeeksi nopeasti kappaleen murtumisen seurauksena.
  - Level %/ Full scale: Kun voiman arvo putoaa ja saavuttaa tietyn rajan. Raja määritellään prosentteina laitteen kuormituskapasiteetista (50 kN). Toiminnon ollessa käytössä tulee kohtaan "Break Detection start point" valita suurempi arvo, kuin määritetty raja-arvo.
  - Level %/Max Force: Kun voiman arvo putoaa maksimiarvon jälkeen ja saavuttaa määrätyn rajan. Raja määritellään prosentteina saavutetusta maksimivoimasta.
  - Last 100 msec: Ellei millään edellä mainituista parametreista havaita rikkoutumista, ohjelma määrittää rikkoutumisen tapahtuneen ajon viimeisen sekunnin kymmenyksen aikana ennen voiman putoamista nolnaan.

## Ohje testausohjelman luomisesta

Kun jokin annetuista arvoista on saavutettu, voidaan valita kuormituspään pysähtymään tai palaamaan aloituspisteeseen.

## Specimen

1. Valitaan näytteen muoto, materiaali, näyte-erien määrä ja yhden erän sisältämä näytteiden määrä.
2. Syötetään näytteen mitat ja testityypistä riippuen muut mitat tarvittaessa.
3. Kullekin näytteelle voidaan antaa myös lisätietoja, esimerkiksi metripaino kohdassa "data/constant."

## Data Processing

Valitaan, mitkä suureet ja muut tiedot halutaan määrittää ja millä parametreilla. Ohjelma näyttää taustalla mallikaavion ja räätälöi valittavissa olevat asetukset valitun testityypin mukaan.

Tärkeimpiä suureita ovat

- Elastic: Kimmomoduuli
- Max: Suurin voima, jännitys ja muodonmuutos
- YS/YP/LYP: Myötörajat
- Break: Voima, jännitys, ja muodonmuutos materiaalin lopullisen pettämisen vaiheessa

Ikkunan oikeassa reunassa voidaan vielä valita, mitkä määritettävistä arvoista näytetään raportissa. Lisäksi voidaan määrittää laadun ja tilastollisen seurannan asetuksia, kuten näyte-erän maksimiarvo, minimiarvo, keskiarvo ja poikkeamat. Alareunaan voi syöttää omia laskukaavoja, jos esimerkiksi haluaa käyttää erilaisia kertoimia kuin oletusasetuksina käytettävissä kaavoissa.

## Chart

1. "Basic settings": Muokataan testeissä piirrettäviin kuvaajiin, mitä suureita mitataan ja lasketaan. Muokattava kuvaaja valitaan vasemmasta yläkulmasta.



**Ohje testausohjelman luomisesta**

2. "Overlay" tulee olla päällä, mikäli halutaan, että samaan aikaan näytetään useampi käyrä. "Offset" määrittää kuvaajien alkupisteiden etäisyydet toisistaan.
3. Toiminnon ollessa käytössä on valittava, näytetäänkö merkkipisteet, kimmoduulin suora, ja myötölujuuden suora.
4. Tyypillisesti y-akselille valitaan voima tai jännitys, kun taas x-akselille muodonmuutosta kuvaava suure eli siirtymä tai venymä. Tämän jälkeen valitaan asteikot. "AutoScale Ratio" on suhde, jossa kuvaajien asteikot muuttuvat arvojen muuttuessa.
5. "Display settings"-kohdassa hienosäädetään kuvaajien ulkoasut.
6. "Pass/fail area"-valikossa kuvaajalle voidaan rajata hyväksytty ja hylätty alue.

**Report**

Suunnitellaan testausraportin ulkoasu ja siinä näytettävät tiedot. Ikkunan oikeasta reunasta valitaan muokattava kohde:

- otsikko
- ylätunniste
- näytteet
- testaus
- kuvaajat
- kuva
- kommentti

Kun kohde on valittu, oikeaan alareunaan aukeaa asetuskenttä. Kukin kohde siirretään esikatselutilassa halutulle paikalle halutun kokoisena.

## Ohje testaamisesta ohjelmaa käyttäen

### Testausohje

Näihin ohjeisiin on olemassa selventävät kuvat, mutta tekijänoikeussyistä niitä ei tässä opinnäytetyöraportissa esitetä.

1. Aloitusvalikosta valitaan ”Select method and test”. Tehdyn testin voi avata valitsemalla ”open test”, jolloin testausikkuna avautuu.
2. Aloitettaessa uusi testi valitaan testausmenetelmä. Näytteen mitat, tuotteen nimi ja testaustiedoston nimi voidaan syöttää tässä vaiheessa tai vaihtoehtoisesti testausikkunan asetusvalikoissa.
3. Testausikkuna aukeaa. Pika-asetusvalikossa ”Quick Setting Panel” voidaan syöttää testausnopeus, näytteen mitat, koejärjestelyn mitat ja raporttiin tulevat tiedot. Kohdasta ”Batch” valitaan näyte-erien määrä ja kenttään ”Qty/batch” ilmoitetaan, montako näytettä yksi erä sisältää. Kun painetaan ”Represent”, ohjelma tekee automaattisesti taulukon, jossa näkyy syötetyt mitat, ym. testikohtaista tietoa. Kohtaan ”Name” voidaan nimetä kukin näyte. Komennolla ”AutoNo.” saadaan automaattisesti yksilöityä näytteet juoksevalla numerolla.
4. Tärkeimmät testin ajoon liittyvät komennot, löytyvät vasemman reunan valikosta ja yläpalkista. Vasemmassa yläkulmassa näkyy testauksen tila ja määritetyjä asetuksia.
5. Tuloksia voidaan tarkastella kullekin näytteelle yksittäin avaamalla ”Results(Single)” tai erätasolla avaamalla ”Results(Batch)”. Apuna tulosten tulkinassa toimivat kuvaajat, jotka näkyvät eri välilehdissä.
6. Kun testit on ajettu, testaustiedosto voidaan tallentaa ohjelman omassa tiedostomuodossa. Raportti voidaan tehdä pdf-muotoon avaamalla ”File->Export->PDF” tai Excel-tilukoksi valitsemalla ”File->Excel Report”.